

Jaakko Tuikka

SEINÄRAKENTEIDEN U-ARVON IN-SITU MITATTAVUUDEN LASKENNALLINEN ARVIOINTI

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Marraskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Jaakko Tuikka: Seinärakenteiden U-arvon in-situ mitattavuuden laskennallinen arviointi
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Marraskuu 2019

Tässä työssä tutkittiin ajasta riippuvien lämpö- ja kosteusteknisten mallinnusten avulla eri tekijöiden vaikutuksia nopeiden U-arvon kenttämittausten suorittamiseen Arcada-ammattikorkeakoulussa kehitetyllä uudella U-arvon mittalaitteella. Työssä tarkasteltiin kuutta erilaista seinärakennetta, jotka ovat tyypillisiä suomalaisia tai saksalaisia seinärakenteita. Tavoitteena oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat merkittävästi U-arvomittausten suorittamiseen eri seinärakenteilla ja ovatko jotkin seinärakenteet selkeästi helpommin tai vaikeammin mitattavissa kuin toiset laskemalla etukäteen asetetut mittauskelpoisuuden ehdot täyttävien tuntien määriä vuodessa. Mittauskelpoisten tuntien määrien vuosi- tai kuukausisummia kutsutaan tässä tutkimuksessa mitattavuusluvuiksi. Lisäksi tutkittiin, lisääkö ulkoilman lämpötilan liukuvan keskiarvon käyttäminen U-arvon laskennassa mitatun lämpövirran avulla mittauskelpoisten hetkien määrää. Tutkimustulosten avulla voidaan parantaa mittalaitteen käyttäjille laadittavaa ohjeistusta. Tämä tutkimus on osa laajempaa RAPID U -projektia, joka on TTY:n / Tampereen yliopiston, Arcada ammattikorkeakoulun, Raksystems Insinööritoimisto Oy:n, FIW Münchenin ja DEN eV:n yhteisprojekti.

Tutkimuksessa havaittiin, että paneeliverhoillun puurankaseinän W2 ja betonisandwich-seinän W3 mitattavuusluvut ovat selkeästi muita tässä tutkimuksessa tarkasteltuja rakenteita korkeampia. Näillä rakenteilla myös pidempiä yhtäjaksoisia mittauskelpoisia ajanjaksoja on enemmän kuin muilla rakenteilla. Puurankaseinä on pohjoiseen suunnattuna mitattavissa lähes 40 % koko vuodesta, betonisandwich-seinä noin 25-30 % vuodesta. Talvikuukausina mittauskelpoisten tuntien osuus on vielä selvästi suurempi. Tiili-villa-tiiliseinällä mittauskelpoista aikaa vuodesta on pohjoisseinällä vain 7 %, ilmavälillisellä tiiliseinällä W5 noin 13 % ja massiivitiilirakenteilla puolestaan 11 % (W1) ja 14-15 % (W6) vuodesta.

Puurankaseinällä W2 seinän suuntauksella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta mitattavuuslukuihin. Betonisandwich-seinällä W3 ja tiili-villa-tiiliseinällä W4 suuntauksen merkitys on selkeästi suurempi: etelän ja lännen välisten ilmansuuntien mitattavuusluvut ovat merkittävästi matalampia kuin muihin ilmansuuntiin. Kaikkein suurin vaikutus seinän suuntauksella on massiivitiilirakenteiden W1 ja W6 sekä ilmavälillisen tiilirakenteen W5 mitattavuuslukuihin. Yhteenvetona voidaan sanoa, että mittaukset kannattaa mahdollisuuksien mukaan tehdä seinistä, joille ei kohdistu tai ole vastikään kohdistunut runsasta viistosadetta. Tuulettuvilla, kevyillä julkisivurakenteilla mitattavan seinärakenteen suuntauksella ei vaikuta olevan suurta merkitystä.

Ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen sopivan mittaiselta ajalta näennäisen U-arvon laskennassa havaittiin tämän tutkimuksen mukaan kasvattavan mitattavuuslukuja osalla rakenteista. Parhaimmillaan mitattavuusluku kasvoi 77 %. Rakenteilla W1, W4 ja W5 ulkoilman keskilämpötilan käytöllä ei havaittu olevan mitattavuuslukuja kasvattavaa vaikutusta.

Seinärakenteiden mitattavuutta rajoittaa pääasiassa mitatusta lämpövirrasta ja vallitsevasta lämpötilaerosta lasketun näennäisen U-arvon tarkkuus suhteessa stationääritilan U-arvoon. Tässä tutkimuksessa sallittiin 5,0 % poikkeama stationääritilan U-arvosta, jotta hetki voitiin tulkita mittauskelpoiseksi. Mikäli sallittua poikkeamaa kasvatettaisiin, kasvaisi mittauskelpoisten tuntien määrä tässä työssä tehtyjen tarkastelujen mukaan merkittävästi. Matalan U-arvon rakenteilla W2, W3 ja W4 on mahdollista lisätä syksyn ja kevään mittauskelpoista aikaa, mikäli Arcadassa kehitetyn nopean U-arvon mittalaitteen vaatimaa lämpövirran minimiarvoa saataisiin pienennettyä.

Työssä tehdyissä vertailumallinnuksissa havaittiin eroja COMSOL:in ja WUFI:n välillä liittyen viistosateen mallintamiseen. Tätä olisi hyvä tutkia lisää. Joka tapauksessa on selvää, että viistosateella on merkittävä vaikutus tiilirakenteiden sisäpinnan lämpövirtaan kummalla tahansa ohjelmalla laskettuna.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Avainsanat: ulkoseinä, U-arvo, lämmönläpäisykerroin, lämmönvastus, lämmönjohtavuus, terminen massa, lämpö, kosteus

ABSTRACT

Jaakko Tuikka: Evaluating the in-situ measurability of U-value of different wall structures

Master's thesis

Tampere University

Civil Engineering

November 2019

The goal of this thesis was to study the effects of different factors on measuring U-value of different types of walls in-situ with the new U-value meter invented by Arcada University of Applied Sciences. The study was conducted by executing time-dependent simulations for six different Finnish or German wall structures. Through simulations it was investigated which factors have a significant effect on measuring U-value of a certain structure. Another goal was to assess which wall structures are easier or harder to measure with this new U-value meter by calculating the amount of hours in a year that satisfy preset conditions for measurability. The effect of using the moving average outdoor temperature on number of measurable hours was also investigated. The results of this study can be used to improve the user's manual of the new U-value meter. This study is a part of a larger RAPID U -project, which is a co-project of TUT / Tampere University, Arcada University of Applied Sciences, Raksystems Insinööritoimisto Oy, FIW München and DEN eV.

In this study it was observed that the number of measurable hours was highest for wood frame wall W2 and concrete sandwich wall W3. For these two structures the periods during which measurements are possible to conduct are also longer than for other structures investigated in this study. W2 can be measured about 40 % and concrete sandwich wall 25-30 % of year. During winter, the share of measurable hours is even higher. For insulated masonry wall (W4) the share of measurable hours in a year is only 7 %, for cavity wall W5 about 13 % and for massive masonry walls 11 % (W1) and 14-15 % (W6) for north oriented wall.

It was observed that the impact of orientation was lowest on wood frame wall W2 and highest on massive masonry walls W1 and W6 and on cavity wall W5. The impact of orientation on concrete sandwich wall W3 and insulated masonry wall W4 is also easy to notice, but less significant than on structures mentioned before. As a conclusion, it is advisable to choose a wall for U-value measurements that is and has not been lately subject to heavy driving rain. When measuring U-value of a lightweight, ventilated facade, orientation seems to be not that important.

Using the average of outdoor temperature in U-value calculations increases the number of measurable hours in a year for several structures, the highest increase is +77 %. For structures W1, W4 and W5 the use of outdoor average temperature does not increase the number of measurable hours.

It was observed that the factor that limits the measurability most is too high deviation of apparent U-value compared to stationary reference U-value. In this study, allowed deviation was 5 %. By tolerating larger deviations, the number of measurable hours would increase significantly, as shown in this study. In case that the minimum limit of heat flow of quick U-value measurement device invented by Arcada could be lowered, the number of measurable hours in spring and autumn would increase for low U-value structures W2, W3 and W4.

According to comparison of results of WUFI and COMSOL models, there appears to be differences between the software regarding the modelling of wind-driven rain. Though some questions related to this subject remain unanswered, it is clear that wind-driven rain has a significant impact on heat flow through brick walls regardless of modelling software. Further investigating this subject would be important in the future.

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

Keywords: exterior wall, U-value, thermal transmittance, thermal resistance, thermal conductivity, thermal mass, heat, moisture

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisellä yliopistolla / Tampereen yliopistolla osana RAPID U -projektia. Kiitän Business Finlandia sekä muita projektin rahoittajia työni mahdollistamisesta.

Kiitos Petteri Huttuselle ja Juha Vinhalle työni ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Petteriä kiitän myös avusta COMSOL:in käytössä sekä Matlab-skriptien tekemisestä. Juha Vinhaa kiitän tämän mielenkiintoisen työn tarjoamisesta ja Mikael Parosta mittalaitteeseen liittyviin kysymyksiin vastaamisesta.

Kiitokset Teemu Jokelalle, jolta sain laskentaa varten lähtötietoja, ja muille rakennusfyysiikan tutkimusryhmän jäsenille, joilta olen saanut apua ja vinkkejä työhöni.

Kiitos vaimolleni Miisalle ja ystävilleni, jotka ovat olleet tukenani tämän projektin ajan.

Tampereella, 20.11.2019

Jaakko Tuikka

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Taustaa	1
1.2	Tavoitteet	3
1.3	Tutkimuksen rajaukset ja sisältö	4
2.	LÄMPÖ JA KOSTEUS.....	6
2.1	Lämpöenergia ja lämmön säilyminen.....	8
2.2	Johtuminen	10
2.3	Konvektio	15
2.4	Säteily	18
2.4.1	Mustan ja harmaan kappaleen säteily	19
2.4.2	Auringon ja ilmakehän säteily	21
2.5	Ilman kosteus.....	25
2.6	Kosteus huokoisissa materiaaleissa	26
2.7	Vesihöyryn diffuusio	28
2.8	Kapillaarinen kosteuden siirtyminen	29
2.9	Kosteuden konvektio	30
3.	MENETELMÄT U-ARVON MÄÄRITTÄMISEKSI.....	31
3.1	U-arvon määrittäminen taulukoiden avulla.....	37
3.2	U-arvon laskeminen SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan	38
3.2.1	Lämmönvastuksen ylä- ja alaraja-arvot	40
3.2.2	U-arvon korjaustermit ja korjattu U-arvo.....	41
3.3	U-arvon kenttämittaukset ISO 9869-1:1994 mukaan	43
3.4	Muita U-arvon kenttämittausmenetelmiä	48
3.5	Arcadassa kehitetty nopea U-arvon mittalaite	49
4.	LASKENNALLISET TARKASTELUT	53
4.1	Laskentaohjelmat ja elementtimenetelmä.....	53
4.1.1	WUFI Pro 5.2	54
4.1.2	COMSOL Multiphysics 5.3a.....	55
4.2	Laskentatarkastelujen lähtötiedot	57
4.2.1	Ulkoilman olosuhteet	57
4.2.2	Sisäilman olosuhteet	59
4.2.3	Materiaaliominaisuudet	60
4.2.4	Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus	61
4.3	Mallinnettavat rakenteet.....	61
5.	TULOKSET JA POHDINTA.....	63
5.1	WUFI:n ja COMSOL:in välillä havaitut erot.....	63
5.2	Kosteudensiirron vaikutus seinärakenteiden käyttäytymiseen.....	64
5.3	Lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuuden vaikutusten tarkastelut.....	65
5.4	Eri osatekijöiden vaikutukset U-arvon mitattavuuteen seinärakenteittain...	66
5.4.1	W1 Massiivitiiliseinä	68

5.4.2	W2 Puurankaseinä	77
5.4.3	W3 Betonisandwich-seinä	86
5.4.4	W4 Tiili-villa-tiiliseinä	95
5.4.5	W5 Eristämätön kuorimuuriseinä	104
5.4.6	W6 Massiivitiiliseinä reikätiilistä	112
6.	YHTEENVETO	122
	LÄHTEET	132
	LIITTEET:	1

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet:

BEM	eng. Boundary element method, reunaelementtimenetelmä
BRE	Building Research Establishment Ltd
DEN e.V	saks. Das Deutsche Energieberater-Netzwerk e.V.
EPBD	eng. Energy Performance of Buildings Directive
EU	Euroopan unioni
FEM	eng. Finite element method, elementtimenetelmä
FIW	saks. Forschungsinstitut für Wärmeschutz
HFM	eng. Heat flow meter
ISO	eng. International Organization for Standardization
RH	eng. Relative humidity, suhteellinen kosteus
SI-järjestelmä	ransk. Système international d'unités, kansainvälinen mittayksikkö-järjestelmä
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
XPS	eng. extruded polystyrene, paisutettu polystyreeni
1D	yksiulotteinen
2D	kaksiulotteinen
3D	kolmiulotteinen

Latinalaiset kirjainmerkit:

<i>A</i>	pinta-ala [m^2]
<i>a</i>	terminen diffusiviteetti [m^2/s]
<i>b</i>	terminen effusiviteetti [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{(1/2)})$]
<i>C</i>	lämpökapasiteetti [J/K]
<i>c</i>	valonnopeus [m/s] tai ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
<i>c_p</i>	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
<i>c_v</i>	ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
<i>D</i>	ilman vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s]
<i>D_w</i>	kosteusdiffusiviteetti [m^2/s]
<i>d</i>	paksuus [m]
<i>E</i>	lämpöenergia [J]
<i>F</i>	näkyvyyskerroin [-]
<i>f</i>	taajuus [Hz] tai vaimennuskerroin [-]
<i>g</i>	kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
<i>H</i>	korkeus [m]
<i>h</i>	lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
<i>I</i>	säteilyn intensiteetti [W/m^2]
<i>k_a</i>	materiaalin ilmanläpäisevyys [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
<i>k_{clouds}</i>	pilvisyysskerroin [-]
<i>m</i>	massa [kg]
<i>n</i>	ilmanvaihtuvuus tuuletusvälissä [$1/\text{h}$]
<i>Nu</i>	Nusseltin luku [-]
<i>P</i>	teho [W]
<i>p</i>	paine [Pa] tai sademäärä [mm/d]
<i>Q</i>	lämpömäärä [W]
<i>q</i>	lämpövirran tiheys [W/m^2]

R	lämmönvastus [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] tai yleinen kaasuvakio [$8,31446 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$]
r	säde [m]
s_d	suhteellinen diffuusiovastus [m]
T	lämpötila [K tai $^\circ\text{C}$]
t	aika [s tai h]
U	sisäenergia [J] tai lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
V	tilavuus [m^3]
v	nopeus [m/s]
W_v	vesihöyrynläpäisykerroin [m/s]
w	materiaalin kosteuspitoisuus [kg/m^3]
y	etäisyys [m]
Z_v	vesihöyrynvastus [s/m]

Kreikkalaiset kirjainmerkit:

α	absorptiokerroin [-] tai mekaanisen kiinnikkeen tunkeumakerroin [-]
β	auringon korkeuskulma [$^\circ$] tai kosteudensiirtokerroin [s/m]
Δ	erotus
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden suhteen [m^2/s]
ε	emissiviteetti [-] tai huokoisuus [%]
ξ_φ	materiaalin kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella [kg/m^3]
θ	kulma [$^\circ$]
λ	lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] tai aallonpituus [m]
μ	dynaaminen viskositeetti [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$] tai diffuusiovastuskerroin [-]
ν	kinemaattinen viskositeetti [m^2/s] tai vesihöyrypitoisuus [kg/m^3]
Φ	lämpövirta [W]
ρ	tiheys [kg/m^3] tai heijastuskerroin [-]
φ	suhteellinen kosteus % RH tai terminen viive [h]
χ	pistemäinen lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
Σ	summa
σ	Stefan-Boltzmannin vakio ($5,670\cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$)
τ	säteilyn läpäisykerroin [-] tai leikkausjännitys [MPa]

Yleisimmät alaviitteet:

a	ilma tai ympäröivä (eng. ambient)
atm	ilmakehä
b	musta kappale
bld	rakennus
cap	kapillaarinen
$cond$	johtuminen
cv	konvektio
D	diffuusi säteily
$diff$	diffuusio
dry	kuiva
e	ulko-
eff	tehollinen
$emit$	emittoituva
f	kiinnike
gen	syntyvä

<i>grd</i>	maan pinta
<i>i</i>	sisä-
<i>in</i>	sisään
<i>lw</i>	pitkäaaltoinen säteily
<i>N</i>	normaalisuuntainen
<i>out</i>	ulos
<i>p</i>	paine
<i>r</i>	säteily
<i>ref</i>	vertailu tai referenssi
<i>s</i>	pinta
<i>sat</i>	kyllästys-
<i>se</i>	ulkopinta
<i>si</i>	sisäpinta
<i>sky</i>	taivas
<i>sol</i>	aurinko
<i>sur</i>	ympäristö
<i>tot</i>	kokonais-
<i>v</i>	tilavuus

Tässä työssä käytetyt operaattorit skalaarimuuttujalle F sekä

vektorimuuttujalle $\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}$:

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial F}{\partial z} \mathbf{k} \quad \text{muuttujan } F \text{ gradientti}$$

$$\nabla^2 F = \frac{\partial^2 F}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 F}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 F}{\partial^2 z} \quad \text{Laplace-operaatio muuttujalle } F$$

$$\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial t} \quad \text{muuttujan } F \text{ osittaisderivaatta ajan suhteen}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad \text{vektorin } \mathbf{F} \text{ divergenssi}$$

1. JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty TTY:llä / Tampereen yliopistolla rakennusfysiikan tutkimusryhmässä osana RAPID U -projektia, joka on Arcada-ammattikorkeakoulun, TTY:n / Tampereen yliopiston, FIW Münchenin (Forschungsinstitut für Wärmeschutz), DEN e.V.:n (Das Deutsche Energieberater-Netzwerk e.V.) ja Raksystems Insinööritoimisto Oy:n muodostaman konsortion yhteisprojekti. Projektin tarkoituksena on kehittää Arcadassa kehitetyllä uudentyypisellä U-arvon mittalaitteella toteutettavien nopeiden U-arvomittausten toteutusta ja luotettavuutta. Luotettavampien mittausten avulla pyritään parantamaan energiansäästölaskelmien tarkkuutta sekä mahdollistamaan energiakorjausten täsmällisempää suunnittelua.

Rakennusfysiikka on sovellettu tieteenala, joka käsittelee rakenneseosien, rakennusten sekä näiden muodostamien kokonaisuuksien lämpö-, kosteus-, ääni- ja valaistusteknistä toimintaa. Rakennusfysiikka tuottaa tietoa siitä, miten on mahdollista rakentaa taloudellisesti ja ympäristöystävällisesti tehtyjä ja toimivia sekä käyttäjilleen terveelliset ja viihtyisät olosuhteet luovia kestäviä rakennuksia. Rakennusfysiikan merkitys on kasvanut viime vuosikymmeninä selvästi energiansäästöpainneiden ja ympäristöystävällisyysvaatimusten kasvaessa sekä sisäilma- ja kosteusongelmiin havahtumisen myötä. (Hens 2017)

1.1 Taustaa

Rakennuskanta kuluttaa noin 40 % kaikesta EU:n alueella kulutetusta energiasta ja tuottaa 36 % hiilidioksidipäästöistä. Noin 35 % EU:n alueella sijaitsevista rakennuksista on vähintään 50 vuotta vanhoja. Rakennuksista korjataan vuosittain valtiosta riippuen 0,4...1,2 % ja korjausmäärää tulisi nostaa energiansäästöjen saavuttamiseksi. Euroopan unionin EPBD-direktiivi vaatii, että kaikkien EU:n alueella rakennettavien rakennusten on oltava lähes nollaenergiarakennuksia vuoden 2020 loppuun mennessä, uusien julkisten rakennusten oli oltava nollaenergiarakennuksia jo vuoden 2018 loppuun mennessä. EPBD-direktiivi vaatii myös energiatodistusten laatimisen rakennuksen myynnin tai vuokrauksen yhteydessä. (European Commission 2018) Energiankulutuslukuja tarkastelemalla voidaan ymmärtää, että rakennusten energiatehokkuuden parantaminen on oleellista, mikäli kasvihuonepäästöjä halutaan vähentää. Lisäksi suuri osa rakennuskannasta on vanhaa ja sen energiankulutuksen tarkastelu voi olla haastavaa puhtaasti laskennallisilla menetelmillä lähtötietojen puuttuessa tai ollessa puutteellisia. Siksi tarvitaan menetelmiä, joilla rakenteiden lämmöneristyskykyä voidaan mitata nykyistä helpommin.

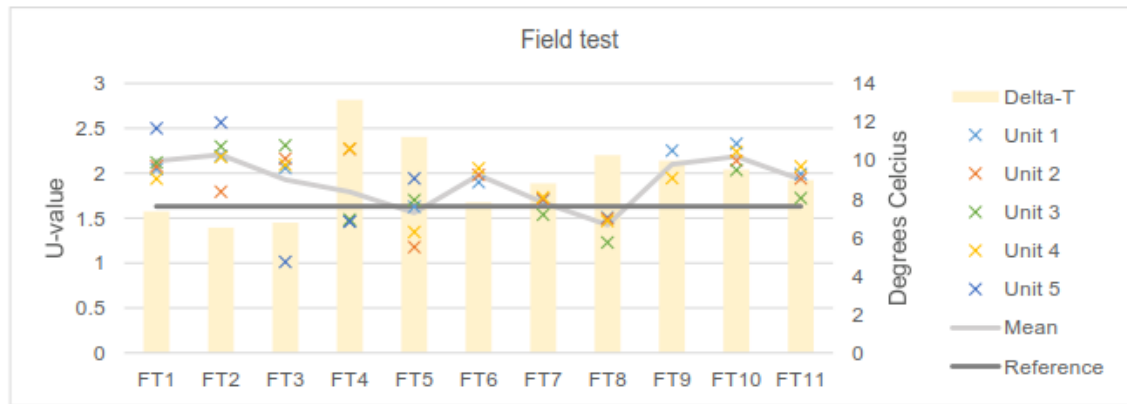
Rakenteen U-arvo eli lämmönläpäisykerroin kuvaa rakenteen kykyä vastustaa lämmön siirtymistä lävitsensä. Mitä suurempi U-arvo on, sitä helpommin lämpöenergia läpäisee rakenteen. U-arvoja käytetään osoittamaan rakenteiden määräystenmukaisuutta sekä laskettaessa rakennusten energiankulutusta, esimerkiksi lämpöhäviölaskelmissa. Rakennosalla tarkoitetaan rakennuksen pääosia, kuten seinää, yläpohjaa tai alapohjaa. Uusien rakennosien U-arvoille on asetettu lainsäädännölliset vertailuarvot, joiden ylittämistä tosin voidaan kompensoida tarvittaessa. Korjausrakentamisessa Suomessa vaatimuksena on yleensä U-arvon puolittaminen verrattuna tilanteeseen ennen korjaustoimenpidettä tai tilanteen säilyttäminen samalla tasolla kuin ennen korjausta. Suuremmissa korjaushankkeissa Suomessa vaaditaan usein uudisrakentamisen U-arvovaatimusten täyttämistä. Tämän hetkiset Suomessa voimassa olevat määräykset rakennusten energiatehokkuuteen liittyen löytyvät ympäristöministeriön asetuksesta ”ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta 1010/2017”. U-arvo määritetään tyypillisesti eri rakennosille stationäärisillä laskelmilla standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukaisesti.

Usein U-arvon toteutumista ei todenneta kokeellisesti ollenkaan rakentamisen jälkeen, sillä helppoa, nopeaa ja luotettavaa tapaa U-arvojen mittaamiseksi kenttäolosuhteissa ei ole tällä hetkellä markkinoilla. Esimerkiksi yleisesti hyväksytty ISO 9869-1:1994 mukainen ja käytössä oleva menetelmä, jossa määritetään U-arvo rakenteen läpi virtaavan lämpövirran ja ulko- ja sisälämpötilojen mittausten avulla, vaatii vähintään 3 vuorokauden mittausajan optimaalisissa olosuhteissa, usein mittaus vaatii tätäkin pidemmän ajan (ISO 9869:1994). Mittauksien suorittaminen leudoissa ilmastoissa tai kesällä on myös ongelmallista, mutta erilaisilla dynaamisilla mittausdatan käsittelymenetelmillä mittauksia voidaan tehdä myös silloin (Deconinck 2017, Atsonios et al. 2017, Gaspar et al. 2016, Deconinck & Roels 2016). Erilaisia tapoja U-arvon määrittämiseksi käsitellään tarkemmin luvussa 3.

Deconinckin (2017) mukaan on mahdollista, että rakennusten todelliset johtumislämpöhäviöt eroavat merkittävästi todellisista häviöistä, koska lasketut lämpöhäviöt perustuvat valmistajien ilmoittamiin tai standardeista luettuihin lämmönjohtavuuksiin ja näistä laskettuihin lämmönvastuksiin. Lisäksi esimerkiksi sisäinen konvektio voi heikentää rakenteiden lämmöneristyskykyä (Hagentoft 2001). On myös osoitettu (Lindberg *et al.* 2012, Reilly & Kinnane 2017), että rakenteen suuri lämpökapasiteetti voi vaikuttaa rakennuksen energiankulutukseen. Erityisesti vanhoilla rakenteilla materiaalien korkeat kosteuspitoisuudet voivat heikentää lämmöneristävyyttä merkittävästi, mutta tämän vaikutusten arviointi vuositason energiakulutuksessa on vaikeaa. Huomattavaa on myös, että rakennusmateriaalien todellista käyttäytymistä eri rakenteissa ja asennustarkkuutta ei oteta huomioon lämpöhäviöitä laskettaessa ja voidaankin perustellusti kysyä, kuinka todennukaisia teoreettisiin arvoihin perustuvat energiatodistukset ovat (Deconinck 2017).

Rakenteiden U-arvon mittaamisesta kenttäolosuhteissa löytyy lukuisia tieteellisiä artikkeleja jo muutaman viimeisen vuoden ajalta, joten aihetta kohtaan on tällä hetkellä paljon

kiinnostusta. Näissä tutkimuksissa on tutkittu nykyisten menetelmien luotettavuutta, esitetty parannusehdotuksia tai kehitetty uusia mittausmenetelmiä. Lyhyt kirjallisuuskatsaus erilaisista U-arvon kenttämittauksiin liittyvistä tutkimuksista löytyy luvusta 3.



Kuva 1.1 Mittaustulokset BRE:n suorittamista kenttämittauksista Arcadassa kehitetyillä nopeilla U-arvon mittalaitteilla (BRE 2017).

Arcadassa on kehitetty uudentyyppinen U-arvon nopeasti ja helposti mittaava mittalaite. Arcadan mittalaitteen mittausperiaate poikkeaa lämpövirtalevyllä tehtävästä U-arvon mittauksesta siten, että rakenteen läpäisevän lämpövirran suoran mittaamisen sijaan laite mittaa lämmitystehoa, joka tarvitaan pitämään mittalaitteen takana oleva seinäpinta samassa lämpötilassa kuin ympäröivä seinä. Laitteeseen liittyen on tehty myös ainakin yksi insinöörityö, jossa suoritettiin kenttämittauksia erilaisille rakenteille ja verrattiin mitattuja arvoja stationääritilassa laskettuihin U-arvoihin (Kivelä 2016). Mittalaitteen tarkkuus lämpövirran mittauksen suhteen on jo todennettu riittäväksi BRE:n (Building Research Establishment Ltd) suorittamilla laboriokokeilla. Kuvassa 1.1 on esitetty BRE:n suorittamista mittauksista saadut tulokset kenttäolosuhteissa, joissa mitattavana rakenteena oli tiiliseinä, jonka U-arvoksi mitattiin ISO 9869-1:1994 mukaisella menetelmällä 1,63 W/(m²·K). Sisä- ja ulko-olosuhteiden vaihtelusta johtuen, mittaustuloksista alle puolet osui 15 % sisälle lämpövirtalevyllä mitatusta referenssiarvosta. (BRE 2017) Koska U-arvo on määritelmän mukaan rakenteen lämmönläpäisykerroin stationäärisessä eli ajasta riippumattomassa tilanteessa, on nopea ja samalla luotettava mittaus mahdollista ainoastaan tilanteessa, jossa rakenteen lämpötilakenttä on lähellä stationääristä tilaa. Kenttämittauksiin liittyen tarvitaan tässä työssä ja laajemmassa Rapid U -projektissa tuotettavaa ohjeistusta mittaajia varten oikeanlaisten mittausolosuhteiden valitsemiseksi, jotta mittaustulokset olisivat luotettavia.

1.2 Tavoitteet

Tässä diplomityössä tehtävät ajasta riippuvat mallinnukset seinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä käyttäytymisestä ovat yksi osa laajempaa projektia, jossa tehdään mittalaitteeseen ja sillä suoritettaviin kenttämittauksiin sekä mittaustiedon tallentamiseen

liittyvää tutkimus- ja kehitystyötä sekä laboratoriokokeita. Yksi koko projektin tavoitteista on löytää reunaehdoja olosuhteille, joissa voidaan olettaa seinärakenteen olevan riittävän lähellä termistä stationääritilaa, jotta nopealla U-arvon mittalaitteella saadaan luotettavia tuloksia.

Työn tavoitteena oli tuottaa laskentamalleja ja tulodataa eri seinärakenteista, jotta voitiin tehdä päätelmiä eri tekijöiden vaikutuksista nopeisiin U-arvomittauksiin. Tämän työn tulodataa on tarkoitus käsitellä myöhemmin kvantitatiivisilla menetelmillä käytännöllisten ohjeiden luomiseksi laitteen käyttäjille ja sopivien mittaushetkien tunnistamiseen kykenevän työkalun luomiseksi. Tutkimuksessa tarkasteltiin vuorokauden- ja vuodenajan sekä seinän suuntauksen vaikutusta U-arvon mittaamiseen kuudessa seinärakenteessa, jotka ovat tyypillisiä Saksassa ja Suomessa. Rakenteet esitellään luvussa 4.3 ja liitteessä 1. Lisäksi tarkasteltiin ulkolämpötilan liukuvan keskiarvon käytön vaikutusta U-arvon laskennassa mittaustuloksista, lämpövirran tiheyden minimivaatimuksen suuruuden sekä vaaditun mittaustarkkuuden vaikutusta mittauskelpoisten tuntien määrää. Ajasta riippuvien mallinnusten avulla selvitettiin, millainen lämpötilaerosta ja lämpövirran tiheydestä laskettu näennäinen U-arvo olisi eri ajanhetkillä verrattuna stationääritilassa laskettuun U-arvoon.

Tuloksena tässä työssä saatiin lämpövirran tiheydestä sekä lämpötiloista laskettuja näennäisiä U-arvoja tunneittain eri rakenteille. Vertaamalla mallinnustuloksista laskettua näennäistä U-arvoa stationääritilassa laskettuun U-arvoon, voidaan päätellä karkealla tasolla mihin aikaan vuodesta tai vuorokaudesta ja kuinka suuren osan vuodesta erityyppisten seinärakenteiden mittaaminen on todennäköisesti mahdollista ja mitkä seinärakenteet aiheuttavat enemmän haasteita mittauksen suhteen.

1.3 Tutkimuksen rajaukset ja sisältö

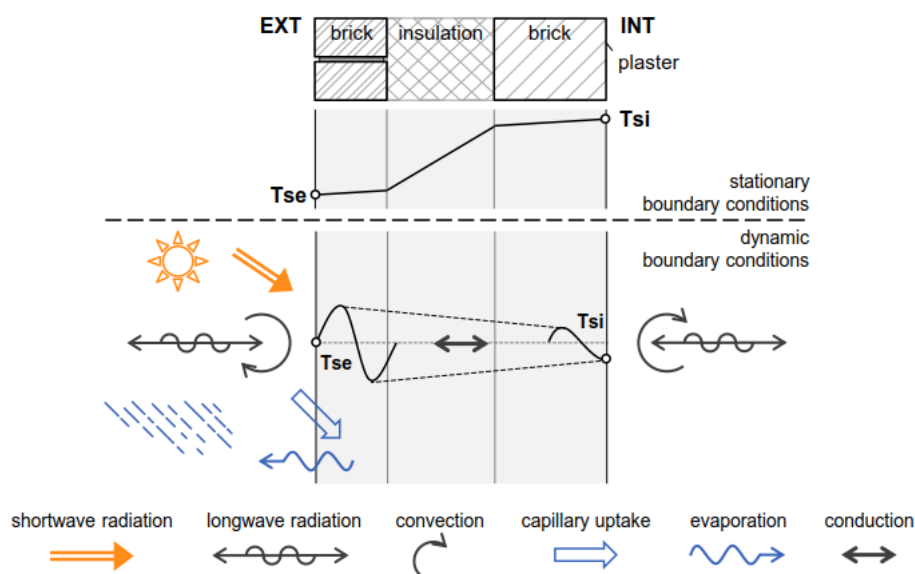
Tässä työssä keskitytään tutkimaan muuttuvien ulkoilman olosuhteiden vaikutusta U-arvon mitattavuuteen erilaisista seinärakenteista. Ulkoilman olosuhteina käytetään TTY:n ja Ilmatieteen laitoksen luomia rakennusfysikaalisia testivuotia, joista kerrotaan enemmän luvussa 4.2 ja liitteessä 4. Tutkimus rajataan lämmitettyihin rakennuksiin, joiden sisälämpötila pidetään jatkuvasti vakiona lämpötilassa 21 °C. Rakennuksen käyttötarkoituksen oletetaan olevan tavanomainen asuin- tai toimistokäyttö. Rakennuksen käyttäjien käyttötottumusten ja -tapojen vaihtelun vaikutusta sisäilmastoon ei oteta huomioon. Tutkimus on rajattu kuuden seinärakenteen tarkasteluun, jotka voivat olla suunnattuja mihin tahansa pää- tai väli-ilmansuuntaan. Erikoistapauksia, kuten seinän kallistuskulman vaihteluita, ei tarkastella. Myöskään muita rakennneosia, kuten kattoja, alapohjia, maanvastaisia seiniä, ovia tai ikkunoita, ei tarkastella tämän työn puitteissa. Tarkasteluissa ei oteta huomioon ilmavuotojen, sisäisen konvektion eikä kylmäsiltojen vaikutuksia.

Luvussa 2 esitetään rakennusfysiikan teoriaa liittyen lämmön ja kosteuden siirtymiseen. Luvussa 3 käydään läpi U-arvon laskentamenetelmiä ja tehdään kirjallisuuskatsaus käytössä oleviin tai kirjallisuudessa esitettyihin U-arvon kenttämittausmenetelmiin. Luvun 3 lopuksi esitellään tarkemmin Arcadassa kehitettyä nopeaa U-arvon mittalaitetta. Luvussa 4 selostetaan työssä tehtävien mallinnusten suorittaminen sekä esitellään lyhyesti tarkasteltavat rakenteet ja käytettävät ohjelmat. Luvussa 5 esitellään mallinnusten perusteella saadut tulokset johtopäätöksineen. Liitteissä on esitetty tarkasteltavat rakenteet, mallinuksissa käytetyt materiaaliominaisuudet ja ilmastodata sekä kuvaajia tuloksista.

2. LÄMPÖ JA KOSTEUS

Tässä luvussa käsitellään lämpöenergiaa ja kosteutta sekä niiden erilaisia siirtymistapoja. Aluksi käsitellään lyhyesti lämpöenergiaa ja sen säilymistä, tämän jälkeen lämmön eri siirtymistapoja. Kosteuden sitoutumista ja siirtymistä tarkastellaan alaluvuissa 2.5-2.9. Luvun 2 tarkoituksena on antaa yleiskuva lämmön ja kosteuden siirtymismuodoista ja niiden merkityksestä rakennusfysiikassa, ei syventyä tarkasti säteily- tai virtausfysiikkaan ja tähän liittyviin differentiaaliyhtälöihin.

Lämpöenergiaa voi siirtyä kolmella tavalla: johtumalla, säteilemällä tai kuljettumalla (konvektio). Lämmön siirtyminen on yleensä yhdistelmä näistä eri energian siirtymistavoista. (Çengel & Ghajar 2011). Kuvassa 2.1 on esitetty seinärakenteeseen vaikuttavat eri lämmönsiirtomekanismit sekä kosteudensiirtomekanismeja. Vasemmalla puolella rakennetta on ulkopuoli ja oikealla sisätila. Seinän ulkopinnan lämpötilaan vaikuttavat auringon lyhytaaltainen säteily, ympäristöstä tuleva pitkäaaltoinen säteily, seinäpinnasta lähtevä pitkäaaltoinen säteily, konvektio ja seinärakenteen läpi johtuva lämpö. Lisäksi kosteudensiirto vaikuttaa lämpötiloihin. Sisäpinnan lämpötilaan vaikuttavat pääasiassa konvektio ja sisäpintaan tuleva ja siitä lähtevä pitkäaaltoinen säteily sekä seinän läpi johtuva lämpö.



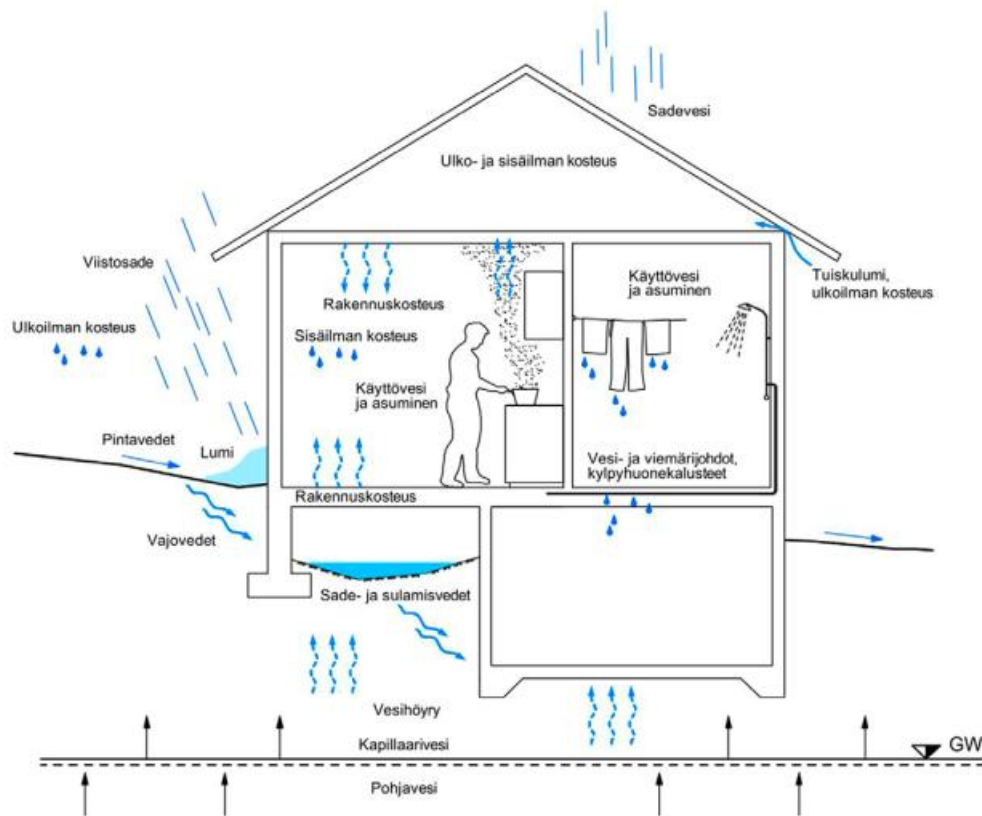
Kuva 2.1 Seinärakenteeseen vaikuttavat lämmönsiirtomekanismit (Deconinck 2017).

Lämmönsiirto jaotellaan usein sen mukaan, onko prosessi stationääritilassa vai ei. Stationääritila merkitsee sitä, että lämpötilakenttä rakenteessa ja lämpövirta rakenteen yli pysyvät vakioina ajanhetkestä riippumatta. Rakennusfysiikan kannalta esimerkkinä voidaan

pitää seinärakenteen läpi johtuvaa lämpövirtaa, joka on vakio koko rakenteen läpi, jos sisä- ja ulkolämpötilat pysyvät vakioina eikä seinärakenne sido tai luovuta lämpöä. (Çengel & Ghajar 2011) Kuvan 2.1 yläosassa katkoviivan yläpuolella on kuvattu stationääristä tilaa, jossa ulko- ja sisälämpötilat ovat vakioarvoja, joten seinärakenteen lämpötilakenttä muuttuu lineaarisesti materiaalikerroksen lämmönjohtavuuden funktiona, jos lämmönjohtavuus ei riipu kosteuspitoisuudesta eikä lämpötilasta.

Tosiasiassa lämpövirta seinärakenteen läpi on aina ajasta riippuva eli epästationäärinen, sillä täysin vakiintuneita olosuhteita ei saavuteta koskaan riittävän pitkäksi aikaa, jotta seinärakenteen lämpötilakenttä ehtisi tasaantua tasapainotilaan. Auringon säteilyn intensiteetti, tuulen suunta ja voimakkuus, sade ja monet muut tekijät tekevät sääoloista jatkuvasti muuttuvat. (Çengel & Ghajar 2011) Epästationääristä tilaa on kuvattu kuvassa 2.1 katkoviivan alapuolella. Sisä- ja ulkolämpötilat muuttuvat jatkuvasti, joten seinärakenteen lämpötilakenttä muuttuu epälineaarisesti. Lisäksi materiaalien lämmönjohtavuus riippuu lämpötilasta ja kosteudesta (Deconinck 2017). Rakenteiden lämmönläpäisykerroin eli U-arvon laskenta tehdään kuitenkin stationääritilassa olettaen vakio-olosuhteet ulos ja sisälle.

Kosteuslähteitä tavanomaisille rakennuksille ovat sisä- ja ulkoilman kosteus, rakennusmateriaaleihin sitoutunut kosteus, sadevesi, vesivuodot ja maaperän kosteus sekä rakentamisen aikana materiaaleihin sitoutunut kosteus. Joidenkin rakenteiden kannalta merkittävä kosteuslähde voi olla perustuksia pitkin nouseva maaperän kosteus. Kosteuslähteitä on havainnollistettu kuvassa 2.2. Rakennusten tavallinen käyttö, kuten ruoanlaitto, hengittäminen ja peseytyminen, lisää sisäilman kosteutta. Rakennusaikana materiaaleihin sitoutuneesta kosteudesta esimerkki on betoni: valun jälkeen betonissa on pitkään huomattavasti enemmän kosteutta, kuin hydrataation edettyä pidemmälle. Sade sekä lisää ilman kosteutta että kohdistuu sateena ja viistosateena suoraan rakenteiden pinnoille. Vesivuodot voivat aiheutua esimerkiksi putkien vuodoista tai sadevesi voi päästä vuotamaan esimerkiksi huonokuntoisen kattorakenteen läpi. Maaperän kosteus aiheutuu sadevedestä ja pohjavedestä. (Hagentoft 2001)



Kuva 2.2 Tavalliset kosteuslähteet rakennuksissa (Holmström, Kantola et al. 2016).

Kosteudensiirtoa voi tapahtua ilmassa konvektion tai diffuusion avulla. Kosteudensiirto huokoisissa materiaaleissa on yhdistelmä vesihöyryn ja nestefaasisa olevan veden siirtymistä. Siirtymismekanismeja ovat ainakin diffuusio, konvektio, kapillaarinen imu, painovoimainen siirtyminen ja ulkoisen paineen aiheuttama siirtyminen. Suhteellisen kosteuden ollessa matala, kosteus siirtyy vain diffuusion avulla, sillä huokosverkostossa ei ole nestemäistä vettä. Jos taas koko huokosverkosto on täyttynyt vedellä, kosteus siirtyy täysin kapillaarisesti tai ulkoisen paineen siirtämänä. Näiden välissä on tilanne, jossa suurimmissa huokosissa tapahtuu kosteuden diffuusiota ja pienemmissä, jo vedellä täyttyneissä huokosissa, kosteus siirtyy kapillaarisesti. (Hens 2017, Hagentoft 2001)

2.1 Lämpöenergia ja lämmön säilyminen

Lämpötila kuvaa partikkeleiden liike-energian määrää. Lämpö on energiamuoto, joka siirtyy systeemien välillä lämpötilaeron takia. Lämpö siirtyy spontaanisti aina korkeamassa lämpötilassa olevasta systeemistä matalamman lämpötilan systeemiin. Systeemillä tarkoitetaan määrätyn partikkelijoukon muodostamaa kokonaisuutta. Suljetun systeemin massa on vakio, mutta energiaa voi siirtyä siihen tai sieltä pois. Eristetyssä systeemissä

energiaa ei siirry systeemin ja sen ympäristön välillä. Avoimen systeemin tilavuus ja muoto ovat vakioita, mutta energiaa ja ainetta voi siirtyä vapaasti systeemiin ja sieltä pois. Avointa systeemiä kutsutaan myös kontrollitilavuudeksi. (Çengel & Ghajar 2011) Kontrollitilavuudella tarkoitetaan tässä systeemiä, jota rajoittaa avoin kontrollipinta, jonka läpi energia ja aine voivat siirtyä (Incropera & DeWitt 1985).

Standardin SFS-EN ISO 7345:2018 mukaan lämpökapasiteetti C [J/K] määritellään kaavan 2.1 mukaisesti systeemin lämpö määrän muutoksena aikayksikköä kohti.

$$C = \frac{dU}{dT} \quad (2.1)$$

missä dU on systeemin sisäenergian muutos [J] ja dT on systeemin lämpötilan muutos [K] (SFS-EN ISO 7345:2018). Ominaislämpökapasiteetti määritellään kaavan 2.2 mukaisesti energiamääränä, joka saa aikaan yhden lämpöasteen nousun aineen lämpötilassa massayksikköä kohti. Ominaislämpökapasiteetti kuvaa siis aineen kykyä varastoida energiaa. Ominaislämpökapasiteetti ilmoitetaan yleensä vakioaineessa c_p [J/(kg·K)] kaavan 2.2 mukaan tai vakiotilavuudessa c_v [J/(kg·K)]. (Çengel & Ghajar 2011)

$$c_p = \frac{C}{m} \quad (2.2)$$

missä m on kappaleen massa [kg]. (SFS-EN ISO 7345:2018)

Ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa on suurempi kuin vakiotilavuudessa, sillä vakioaineessa oleva systeemi voi laajentua, mikä vaatii työtä ja kuluttaa energiaa. Nesteiden ja kiinteiden aineiden tilavuus pysyy likimain samana eri lämpötiloissa ja paineissa, joten näille ominaislämpökapasiteettia voidaan pitää vakiona. Kaasuille tämä ei päde. Ominaislämpökapasiteetti riippuu yleisesti lämpötilasta ja paineesta, kokoonpuristumattomilla aineilla vain lämpötilasta. (Çengel & Ghajar 2011) Täten kiinteille aineilla ja nesteille voidaan todeta ominaislämpökapasiteetin vakiotilavuudessa ja vakioaineessa olevan yhtä suuret kaavan 2.3 mukaan.

$$c_p = c_v = c \quad (2.3)$$

Usein lämmönjohtavuuden tarkasteluissa käytetään massayksikköä kohti ilmoitetun ominaislämpökapasiteetin sijaan volumetristä lämpökapasiteettia ρc_p [J/(m³·K)], joka ilmoittaa materiaalin lämmönvarastointikyvyn tilavuusyksikköä kohti. (Çengel & Ghajar 2011)

Systeemin sisäenergia U tarkoittaa molekyylien liike- ja potentiaalienergian summaa. Sisäenergia koostuu molekyylien liike-energiasta eli tuntuvasta lämmöstä (eng. *sensible heat*), aineen faasiin liittyvää latentista energiasta (eng. *latent energy*), atomien välisiin sidoksiin sitoutuneesta kemiallisesta energiasta sekä atomiytimiin sitoutuneesta ydinenergiasta. Termodynamiikan ensimmäisen lain (kaava 2.4) mukaan energia voi muuttaa

muotoaan, mutta sitä ei voi hävitä eikä syntyä prosessin aikana. Lämmönsiirtoon liittyvissä tarkasteluissa ollaan yleensä kiinnostuneita vain energian muodoista, jotka siirtyvät lämpötilaeron vaikutuksesta, siis lämmöstä. Tästä syystä muut energiamuodot yhdistetään usein yhteiseksi termiksi energiantuotto, E_{gen} . (Çengel & Ghajar 2011)

Termodynamiikan ensimmäisen lain mukaan suljetulle systeemille on voimassa kaavan 2.4 mukainen yhtälö.

$$E_{in} - E_{out} + E_{gen} = \Delta U = mc_v \Delta T, \quad (2.4)$$

missä E_{in} = systeemiin tuotava energia [J], E_{out} = systeemistä poistuva energia [J], E_{gen} = kemiallinen-, ydin-, mekaaninen- ja sähköenergia [J], ΔU = systeemin sisäenergian muutos [J], ΔT = systeemin lämpötilan muutos [K]. (Çengel & Ghajar 2011)

Energian säilymlaki kertoo, että systeemiin tulevan ja sieltä poistuvan energian sekä systeemissä syntyvän energian summa vastaa systeemin sisäenergian muutosta eli systeemiin sitoutunutta energiaa, joka määrittää systeemin lämpötilan.

2.2 Johtuminen

Johtuminen tarkoittaa materiaalin lämpötilaerojen tasaantumisen aiheuttamaa lämmön siirtymistä suoraan partikkeleiden kontaktin välityksellä, ilman että ainetta siirryy. Liikeenergia siis tasaantuu partikkeleiden välillä eli suurempienergiset partikkelit luovuttavat energiaansa matalampienergisille. Johtumista tapahtuu kaikissa materiaaleissa, mikäli lämpötilaero on olemassa. Puhdasta johtumista esiintyy vain kiinteissä aineissa. (Incropera & DeWitt 1985) Kaasuissa ja nesteissä johtuminen aiheutuu molekyylien törmäyksistä niiden jatkuvassa liikkeessä, kiinteissä aineissa molekyylien värähtelystä hilassa sekä vapaiden elektronien kuljettamasta energiasta (Çengel & Ghajar 2011).

Johtumalla siirtyvä lämpö homogeenisessa ja isotrooppisessa materiaalissa riippumatta olomuodosta voidaan esittää ranskalaisen fyysikko Fourierin (1768-1830) lain avulla (kaava 2.5).

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.5)$$

missä q_x on johtumisesta aiheutuva lämpövirran tiheys x-suunnassa [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], λ on materiaalille ominainen lämmönjohtavuus, joka voi riippua materiaalin lämpötilasta, vallitsevasta paineesta ja kosteuspitoisuudesta [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] ja T on lämpötila [K].

Fourierin laki (kaava 2.5) voidaan yleistää vektorimuodossa kolmiulotteisiin tapauksiin, jolloin saadaan kaava 2.6.

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

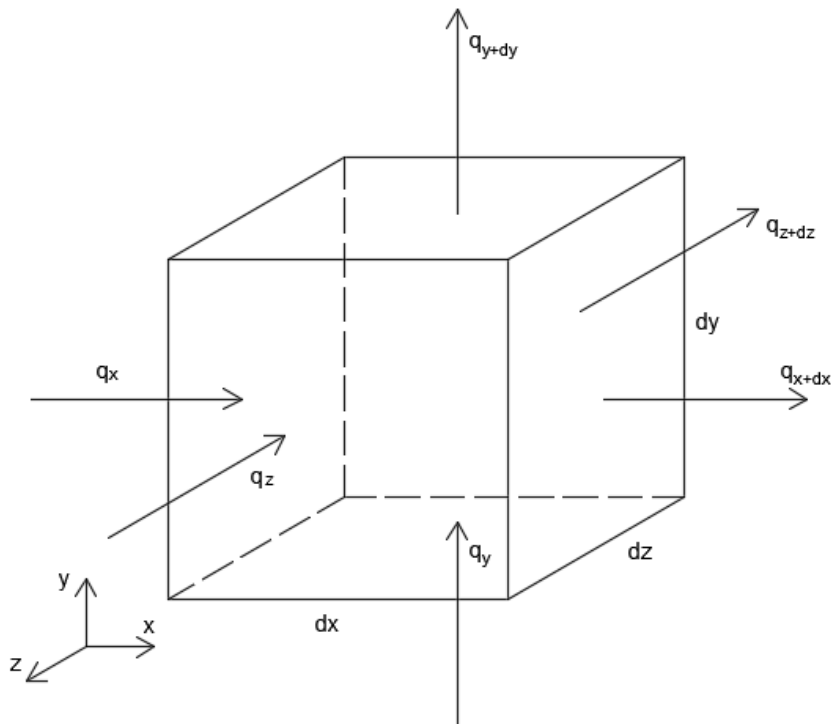
missä ∇ on gradientti

$$\nabla = \left(\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

ja \mathbf{q} on lämpövirtavektori

$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i} + q_y \mathbf{j} + q_z \mathbf{k}$$

Käsitellään infinitesimaalisen pientä kontrollitilavuutta $dV = dxdydz$, jota havainnollistetaan kuvassa 2.3.



Kuva 2.3 Kontrollitilavuus sekä siihen tulevat ja siitä lähtevät lämpövirrat.

Kontrollitilavuuteen tuleva lämpömäärä x-suunnassa voidaan ilmoittaa Fourierin yhtälön (kaava 2.5) avulla. Kontrollitilavuudesta poistuva lämpömäärä pisteessä $(x + dx, y, z)$ voidaan kirjoittaa käyttäen Taylorin approksimaatiota.

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \cdot \frac{(dx)^2}{2!} + \dots \quad (2.7)$$

Kaavan 2.7 korkeamman kertaluvun termit unohdetaan, koska dx on hyvin pieni, ja käsitellään vain kahta ensimmäistä termiä, jolloin saadaan yksinkertaistettua kaava 2.7 alla olevaan muotoon.

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.8)$$

Yleistämällä Taylorin approksimaation avulla saatu kontrollitilavuudesta lähtevä lämpövirran tiheys x-suunnassa (kaava 2.8) sekä Fourierin yhtälö kolmiulotteiseen karteesisen koordinaatistoon (kaava 2.6) voidaan kontrollitilavuuteen johtumalla siirtyvän energian kasvua ajan suhteen kuvata kaavalla 2.9.

$$\begin{aligned} \dot{E} = & q_x \cdot dydz + q_y \cdot dxdz + q_z \cdot dxdy - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) \cdot dydz - \\ & \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) \cdot dxdz - \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \cdot dxdy \end{aligned} \quad (2.9)$$

Merkitään $dxdydz = dV$ ja \dot{E} on aikaderivaatta, jolloin saadaan kaavat 2.10 ja 2.11.

$$\dot{E} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dV \quad (2.10)$$

$$\dot{E} = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) dV \quad (2.11)$$

Kontrollitilavuuteen varastoituneen lämpöenergian määrän kasvu voidaan toisaalta ilmoittaa lämpötilan muutoksen, materiaalin tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin avulla (kaava 2.12).

$$\dot{E} = \left(\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV \quad (2.12)$$

Energian säilymislain perusteella (kaava 2.4) voidaan nyt kirjoittaa tasapainoyhtälö kontrollitilavuuteen tulevan ja siitä lähtevän lämpövirran sekä siihen varastoituneen lämmön välille olettaen, että kontrollitilavuuden sisällä ei ole lämmönlähteitä eikä lämpönieluja.

Yhdistämällä kaavat 2.12 ja 2.11 saadaan

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.13)$$

missä ρ on tiheys [kg/m^3], c on ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$] ja divergenssi

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}$$

Sijoitetaan yhtälöön 2.13 Fourierin laki (kaava 2.5) ja täten saadaan yleisessä muodossa oleva lämpöyhtälö:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.14)$$

Kaavassa 2.14 esitetty yleinen lämpöyhtälö voidaan kirjoittaa auki muotoon

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Jos lämmönjohtavuus on vakio eri suuntiin, saadaan yhtälö kirjoitettua yksinkertaisemmassa muodossa:

$$\lambda (\nabla^2 T) = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.15)$$

missä Laplace-operaatio on

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$$

Yhtälö 2.15 auki kirjoitettuna ja jaettuna puolittain lämmönjohtavuudella on

$$\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} + \frac{\partial T}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Yhtälön 2.15 oikea puoli kuvaa kontrollitilavuuteen varastoitunutta lämpöenergiaa tilavuusyksikköä kohti. Mikäli kuvataan ajasta riippumatonta tilannetta, ei kontrollitilavuuteen varastoidu energiaa ja siten yhtälön oikea puoli saa arvon nolla (Laplace'n yhtälö). Myös voitaessa olettaa lämpövirta yksi- tai kaksiulotteiseksi, yhtälö yksinkertaistuu. (Hagentoft 2001)

Lämpöyhtälö itsessään ei kerro mitään aineen reunojen lämpötiloista tai pintoihin vaikuttavista lämmönsiirtomekanismeista, joten ne on määritettävä reunaehdoin. Lämpöyhtälön ratkaisu on matemaattisesti ajateltuna integraalilaskentaa ja integroinnissa syntyy aina

niin kutsuttuja integrointivakioita, joiden arvo määritetään reunaehtojen (eng. *boundary condition*) avulla. Lämpöyhtälön ratkaisemiseksi on määriteltävä kaksi reunaehtoja joista johtumissuuntaa kohti, koska lämpöyhtälö sisältää toisen asteen derivaattoja koordinaattien suhteen. Epästationäärisessä tapauksessa on määriteltävä lisäksi alkuehto (eng. *initial condition*), joka ilmoittaa esimerkiksi lämpötilan tietyssä pisteessä ajan hetkellä $t = 0$. Yleisimpiä määritettäviä reunaehtoja ovat lämpötilat, lämpövirran tiheydet sekä lämmönsiirron tasapainoyhtälöt reunoille. (Çengel & Ghajar 2011)

Fourierin laki (kaava 2.5) määrittelee materiaaliominaisuuden nimeltään lämmönjohtavuus, λ [W/(m·K)], joka kuvaa sitä, kuinka hyvin lämpö siirtyy johtumalla kyseisen materiaalin läpi. Lämmönjohtavuus riippuu lämpötilasta, mutta riippuvuuden voimakkuus riippuu aineen rakenteesta ja faasista. Monissa tilanteissa voidaan olettaa lämmönjohtavuuden pysyvän vakiona, mikäli tarkastellaan suhteellisen pienen lämpötilaskaalan alueella tapahtuvia tilanteita. Jos tarkastellaan myös kosteuden siirtymistä, voidaan ottaa huomioon lämmönjohtavuuden riippuvuus kosteuspitoisuudesta. Materiaaleja, joiden lämmönjohtavuus on korkea, kutsutaan johteiksi ja materiaaleja, joiden lämmönjohtavuus on pieni, kutsutaan eristeiksi. Kaasujen lämmönjohtavuudet ovat alhaisimpia ja metallien sekä timantin taas korkeimpia. Yleisesti voidaan sanoa, että kiinteässä olomuodossa olevien aineiden lämmönjohtavuudet ovat korkeimpia ja kaasujen matalimpia. Kaasuilla ja nesteillä lämmönjohtavuus laskee, kun moolimassa kasvaa. (Çengel & Ghajar 2011)

Terminen diffusiviteetti a [m²/s] kuvaa sitä, kuinka nopeasti lämpö johtuu materiaalin läpi. Mikäli oletetaan materiaalin lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin sekä tiheyden olevan vakioita, voidaan termien diffusiviteetti määrittellä lämmönjohtavuuden ja lämpökapasiteetin suhteena kaavan 2.16 mukaan.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.16)$$

Hyvin lämpöä johtavissa materiaaleissa, joiden lämpökapasiteetti on pieni, lämpö johtuu nopeasti materiaalin läpi, koska lämpöenergiaa sitoutuu materiaaliin vain vähän. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi tavanomaiset metallit. (Çengel & Ghajar 2011) Terminen effusiviteetti b kuvaa kappaleen kykyä vaihtaa energiaa ympäristönsä kanssa. Materiaali, jolla on korkea effusiviteetti, luovuttaa ja sitoo pinnastaan lämpöä helposti, kuten esimerkiksi useimmat metallit. Effusiviteetti määritellään kaavan 2.17 mukaan.

$$b = \sqrt{\lambda c} \quad (2.17)$$

Missä b on termien effusiviteetti [W/(m²·K·s^(1/2))]. (Verbeke & Audenaert 2018)

Rakenneosat ovat yleensä läpinäkyvättömiä kappaleita (ks. luku 2.4) eli oletetaan, ettei säteily läpäise niitä. Lisäksi rakennuksen vaippa pyritään saamaan mahdollisimman ilmatiiviiksi esimerkiksi seuraavista syistä: estetään haitallinen vesihöyryn siirtyminen rakennuksen sisältä vaipparakenteisiin ja haitallisten partikkeleiden tai kaasujen siirtyminen rakenteista tai ulkoa sisäilmaan, vähennetään konvektion aiheuttamaa lämmönsiirtoa vaipan läpi sekä tämän aiheuttamaa jäähdyttävää vaikutusta ja mahdollistetaan ilmanvaihdon säätäminen halutun laiseksi (Vinha 2014). Huokoisen materiaalin sisällä tapahtuva lämmön siirtyminen on summa mikroskooppisella tasolla tapahtuvasta johtumisesta, konvektiosta ja säteilystä. Makroskooppisen kokoisesta kappaleesta voidaan kuitenkin mitata lämmönjohtavuus materiaalille. Tällöin puhutaan edelleen lämmönjohtavuudesta, vaikka mitattu arvo sisältääkin näiden kaikkien lämmönsiirtomekanismien vaikutukset. Rakennuksen vaipan läpi tapahtuu ilmavuotoja vain tahattomasti ja säteilyn ei katsota läpäisevän rakenneosia, pois lukien ikkunat ja vastaavat valoa läpäisevät rakenneosat. Ilmakerroksia sisältävissä rakenteissa myös konvektiolla ja säteilyllä on merkitystä tarkasteltaessa rakenneosan läpäisevää lämpövirtaa.

Kylmäsillalla tarkoitetaan rakennuksen vaipan osaa, jossa muuten tasainen lämpötilakenttä muuttuu merkittävästi ympäröivää materiaalia paremmin lämpöä johtavan osan lävistäessä osan rakenteesta tai koko rakenteen. Kylmäsilta voi aiheutua myös materiaali-kerrosten paksuuden vaihtelusta tai liitos- tai nurkkakohdissa ilmenevästä tilanteesta, jossa ulko- ja sisäpuolen pinta-alat, joiden läpi lämpö siirtyy, eroavat merkittävästi toisistaan. (SFS-EN ISO 10211:2017)

2.3 Konvektio

Konvektio tarkoittaa energian siirtymistä fluidin (nesteen tai kaasun) virtauksen mukana. Konvektio voidaan jakaa pakotettuun ja luonnolliseen konvektioon sen mukaan, mikä fluidin liikkeen aiheuttaa. Luonnollisessa konvektiossa fluidin virtaus aiheutuu painovoiman ja lämpötilaeroista aiheutuvien tiheyserojen yhdessä aiheuttamasta nosteesta. Esimerkiksi lämpöpatterin lämmittäessä ympärillään olevaa ilmaa, sen tiheys laskee ja ilma nousee ylöspäin, koska tiheysero pyrkii tasoittumaan. Pakotetussa konvektiossa jokin tarkasteltavan systeemin ulkopuolinen voima aiheuttaa fluidin liikkeen, tyypillinen esimerkki tästä on tuuli. Konvektio ei kuitenkaan ole juuri koskaan puhtaasti pakotettua tai luonnollista vaan näiden yhdistelmä. Konvektio tarkoittaa aina jollain tavalla kuljettumista. Kiinteän pinnan ja sitä ympäröivän fluidin välisen lämmönsiirron nopeutta määrittävät usein pintaa huuhtovien virtausten nopeudet. Myös tiettyihin faasimuutosprosesseihin liittyy erittäin keskeisesti konvektio, sillä esimerkiksi höyrystymisessä veden tilavuus kasvaa suuruusluokaltaan tuhatkertaiseksi, mikä johtaa vettä keittäessä voimakkaasti lämpöä siirtäviin kuplavirtauksiin. (Çengel & Ghajar 2011, Hens 2017)

Konvektiivista lämpövirran tiheyttä q_{cv} [W/m²] voidaan kuvata Sir Isaac Newtonin (1642-1727) mukaan nimetyllä Newtonin jäähtymislaila (Çengel & Ghajar 2011):

$$q_{cv} = h_{cv}\Delta T \quad (2.18)$$

missä h_{cv} = konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m²·K)] ja $\Delta T = T_s - T_a$ on lämmönsiirtopinnan pintalämpötilan T_s [K] ja lämmönsiirtopinnan ohi virtaavan fluidin lämpötilojen T_a [K] erotus. Fluidin lämpötilana on käytettävä lämpötilaa riittävän kaukana lämmönsiirtopinnasta, sillä aivan pinnan lähellä fluidin lämpötila on sama kuin lämmönsiirtopinnalla.

Konvektion avulla siirtyvään lämpömäärään vaikuttavat hyvin paljon fluidin ominaisuudet, kuten dynaaminen viskositeetti, lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti. Lämmönsiirtokerroin ei ole fluidin ominaisuus vaan kokeellisesti mitattava arvo, joka riippuu mm. pinnan karheudesta, virtauksen tyypistä ja virtausnopeudesta. Lämmönsiirtokerroin pinnan ja fluidin välillä rakennusten ulkopinnoilla muuttuu todellisuudessa jatkuvasti, koska ilmavirtaukset eivät koskaan ole täysin vakaita. Tyypillisesti lämmönsiirtoon liittyvissä laskelmissa käytetään kuitenkin lämmönsiirtokertoimelle jollain tavalla määritettyä keskiarvoa. Rakennusfysikaalisia lämmönsiirron laskentatarkasteluja varten yhdistetyn lämmönsiirtokertoimien arvot, joissa on mukana säteilyn lämmönsiirtokerroin, voidaan ottaa standardista SFS-EN ISO 6946:2017. Fluidien virtaus voidaan jakaa laminaariseen ja turbulentiin virtaukseen sekä näiden yhdistelmään. Laminaarissa virtauksessa kontrollitilavuuden sisältämien molekyylien keskimääräisen nopeuden (bulkkinopeus) jakauma tarkasteltavalla alueella on suhteellisen tasainen. Turbulentissa virtauksessa partikkeleiden liike muuttuu kaoottiseksi sekä pyörteileväksi ja bulkkinopeus sisältää voimakkaita gradientteja. (Hens 2017, Çengel & Ghajar 2011)

Fluidin virratessa pinnan yli, fluidin lämpötila, virtausnopeus ja massavirta fluidin ja pinnan välillä ovat verrannollisia tarkastelupisteen etäisyyteen pinnalta. Kuvitellaan fluidin virtaavan laminaarisesti tasaisen levyn yli. Fluidin partikkeleiden ja levyn pinnan välille syntyvä kitka estää partikkeleiden liikkeen aivan pinnan vieressä. Näiden partikkeleiden liikkeen pysähtyminen hidastaa vuorostaan kitkan kautta seuraavien fluidikerrosten liikettä, kunnes riittävän kaukana pinnasta kitkan vaikutus on muuttunut häviävän pieneksi ja virtausta pidetään vapaana. Kerrosta, jossa fluidin ja pinnan välisen kitkan vaikutus on havaittavissa eli yleensä nopeuden ollessa alle 99 % vapaasta virtausnopeudesta, nimitetään nopeusrajakerrokseksi (eng. *velocity boundary layer*). Rajakerroksen paksuus kasvaa sen mukaan mitä pidemmän matkan fluidi virtaa levyn päällä. (Incropera & DeWitt 1985, Çengel & Ghajar 2011)

Pinnan ja fluidin välille syntyvä kitka aiheuttaa pinnalle leikkausjännityksen τ_w , joka on newtonilaisilla fluideilla, kuten ilmalla, vedellä ja öljyillä, verrannollinen fluidin nopeusgradienttiin seuraavan yhtälön 2.19 mukaisesti

$$\tau_w = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.19)$$

missä μ on dynaaminen viskositeetti [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$], v on fluidin virtausnopeus [m/s] ja y on kohtisuora etäisyys fluidin ja pinnan välisestä rajapinnasta [m]. Viskositeetti kuvaa fluidin kykyä vastustaa muodonmuutosta ja tämä ominaisuus on riippuvainen lämpötilasta. Nesteiden viskositeetti kasvaa lämpötilan laskiessa ja kaasujen puolestaan laskee. Toisinaan viskositeetti ilmoitetaan kinemaattisena viskositeettina ν dynaamisen viskositeetin sijaan. Kinemaattinen viskositeetti määritellään seuraavan kaavan 2.20 mukaan

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.20)$$

missä ν on kinemaattinen viskositeetti [m^2/s], ρ on tiheys [kg/m^3]. (Çengel & Ghajar 2011)

Ajatellaan nyt fluidin virtaavan laminaarisesti tasaisen levyn yli, joka on fluidin lämpötilasta poikkeavassa vakio­lämpötilassa. Fluidin ja levyn rajapinnassa levyn kanssa kosketuksiin joutuvat fluidin partikkelit saavuttavat termisen tasapainon levyn pinnan kanssa. Nämä partikkelit taas siirtävät lämpöä seuraavan fluidikerroksen partikkeleille ja fluidiin kehittyy lämpötilaeroja. Aluetta, jossa fluidissa esiintyy lämpötilaeroja, kutsutaan lämpötilarajakerrokseksi (eng. *temperature boundary layer*). Rajakerroksen määrittää alue, jolla kohtisuora etäisyys fluidin ja pinnan rajapinnasta täyttää ehdon (kaava 2.21)

$$\frac{(T_s - T)}{(T_s - T_e)} = 0,99 \quad (2.21)$$

missä T_s on pinnan lämpötila [$^{\circ}\text{C}$], T on fluidin lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] etäisyydellä y ja T_e on fluidin lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] riittävän kaukana rajapinnasta. Lämpötilarajakerroksen paksuus kasvaa levyn yli tapahtuvan virtausmatkan kasvaessa. (Incropera & DeWitt 1985, Çengel & Ghajar 2011)

Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen tarkka määrittäminen on hankalaa, sillä se riippuu monimutkaisella tavalla esimerkiksi lämpötilasta, fluidin virtauksen suunnasta ja nopeudesta sekä lämmönsiirtopinnan ominaisuuksista (Schmidt 2012). Yleisille tapauksille voidaan määrittää karkeita arvoja esimerkiksi lähteen (Hagentoft 2001) mukaisilla kaavoilla.

Konvektiotarkasteluissa on tyypillistä käyttää dimensiottomia lukuja vähentämään muuttujien määrää. Yksi tällainen dimensioton luku on Nusseltin luku (kaava 2.22), joka kuvaa

ilmakerroksessa (tai muussa fluidissa) tapahtuvan konvektiivisen lämmönsiirron suhdetta johtumiseen. (Çengel & Ghajar 2011) Tarkasteltaessa esimerkiksi avohuokoisella lämmöneristeellä eristettyä seinärakennetta, Nusseltin luvun avulla voidaan tarkastella sisäisen konvektion osuutta koko seinärakenteen läpi kulkevasta lämpövirrasta.

$$Nu = \frac{q_{cv}}{q_{cond}} \quad (2.22)$$

Rakenteissa, joissa on tuuletusväli tai tuulettumaton ilmakerros rakennekerrosten välissä, lämpö siirtyy johtumalla rakennekerrosten läpi ja konvektion sekä säteilyn avulla ilmakerroksessa. Jos ilma pääsee virtaamaan ilmaraossa vapaasti, huokoisen eristekerroksen läpi tai kovan eristeen ympäri, ilma lämpenee lämpimällä puolella ilmakerrosta ja jäähtyy viileämmällä puolella. Painovoima saattaa tällöin käynnistää luonnollisen konvektion, joka muuttaa rakenteen lämpötekniistä käyttäytymistä siten, että lämpövirta ja rakenteen pintojen lämpötilat eivät ole enää vakioita vaan vaihtelevat riippuen mittauspisteestä, seinien tapauksessa riippuen korkeussijainnista. Ulkolämpötilan ollessa matalampi kuin sisälämpötila, seinän sisäpinnan lämpötila laskee sitä mukaa, mitä matalammalla tarkasteltava piste on. Tästä aiheutuu se, että mitattu lämpövirta on suurin seinän alaosassa. Jos ulkolämpötila on sisälämpötilaa korkeampi, luonnollisen konvektion vaikutukset seinässä näkyvät taas voimakkaimmin seinän yläosassa. (Deconinck 2017)

Huokoisissa eristemateriaaleissa, kuten lasi- ja mineraalivillassa, voi ilmetä konvektiota johtuen lämpötila- tai paine-eroista rakenneosassa. Konvektio eristekerroksessa saattaa heikentää eristeen lämmöneristyskykyä merkittävästi. (Hagentoft 2001) Konvektio saattaa lisäksi heikentää rakenteen kosteustekniistä toimintaa keräämällä kosteutta yhteen kohtaan eristettä. Sisäisen konvektion mahdollisuus kasvaa yhtenäisen eristekerroksen paksuuden ja eristeen ilmanläpäisevyyden sekä lämpötilaeron kasvaessa. Sisäisen konvektion riskiä voidaan pienentää tiheämpiä eristeitä käyttämällä tai jakamalla eristekerros useampaan osaan ilmatiiviillä, mutta vesihöyryä läpäisevällä kalvolla. Yläpohjissa on myös mahdollista käyttää alimmaisena eristekerroksena tiheämpää eristettä puhallusvilan tai muun kevyen eristeen alla. (Vinha 2014)

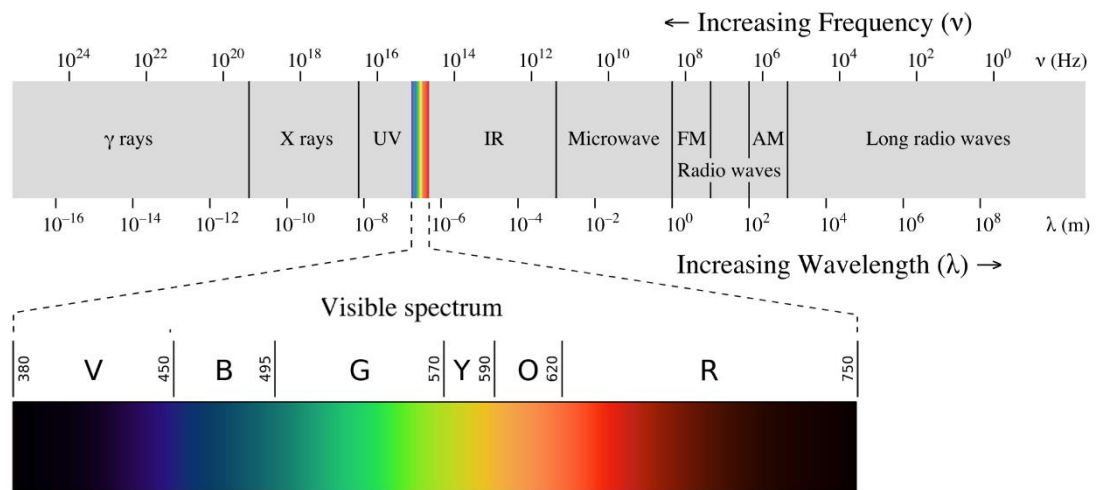
2.4 Säteily

Kaikki materia emittoi säteilyä. Emittoivat pinnat jäähtyvät samalla teholla, millä lämpöä emittoituu niiltä säteilyn muodossa pois. Säteily siirtää energiaa ilman väliainetta eli myös tyhjiössä, toisin kuin johtuminen tai konvektio. *James Clerk Maxwell* esitti vuonna 1864, että kiihdytetyt varaukset tai muuttuva sähkövirta aiheuttavat kaikkialla vallitsevaan sähkö- ja magneettikenttään aaltoliikemäistä muutosta. Näitä kenttiä kutsutaan sähkömagneettiseksi säteilyksi tai sähkömagneettiseksi aaltoliikkeeksi, joka kuvaa aineen emittoimaa energiaa atomitason sähköisten muutosten myötä. *Heinrich Hertz* osoitti näi-

den aaltojen olemassaolon vuonna 1887. Sähkömagneettiset aallot kulkevat tyhjiössä valonnopeudella ja väliaineessa niiden nopeus riippuu väliaineen ominaisuuksista. (Incropera & DeWitt 1985, Çengel & Ghajar 2011) Kaavassa 2.23 määritellään aallonpituus.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.23)$$

missä λ on aallonpituus [m], c on valonnopeus [m/s] kyseisessä väliaineessa ja f on taajuus [Hz (= 1/s)]. Planckin kvanttiteorian mukaan energia siirtyy fotonien tai kvanttien eli diskreettien ”pakettien” siirtyessä. Sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituusalueille on annettu yleisesti käytössä olevat omat nimet. (Çengel & Ghajar 2011) Sähkömagneettisen säteilyn spektri ja aallonpituusalueiden nimet on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4 Sähkömagneettisen säteilyn spektri (Gringer 2013).

Kuvasta 2.4 nähdään, että rakennusfysiikan kannalta olennaisimmat sähkömagneettisen säteilyn tyypit eli UV-säteily, näkyvä valo ja infrapunasäteily sijoittuvat sähkömagneettisen spektrin keskialueelle. UV-säteilyn aallonpituus vaihtelee noin 10...400 nm välillä, näkyvän valon aallonpituusalue on noin 380...750 nm. Lämpösäteilynä pidetään säteilyä, jonka aallonpituus on välillä 100... 10^6 nm sisältäen ultravioletti- ja infrapunasäteilyn sekä näkyvän valon. (Hens 2017)

2.4.1 Mustan ja harmaan kappaleen säteily

Kaikki aine, jonka lämpötila on korkeampi kuin absoluuttinen nollapiste, jäähtyy emittoimalla lämpösäteilyä. Emittoituvan säteilyn määrä eri aallonpituuksilla riippuu kappaleen materiaalista, pinnasta ja lämpötilasta. Mustalla kappaleella (eng. *black body*) tarkoitetaan idealisoitua kappaletta, joka emittoi suurimman mahdollisen määrän säteilyä

diffuusisti eli tasaisesti jokaiseen suuntaan ja absorboi kaiken itseensä kohdistuvan säteilyn. Mustan kappaleen emittoiman säteilyn tehoa pinta-alayksikköä kohti voidaan kuvata *Stefan-Boltzmannin* lailla kaavan 2.24 mukaan.

$$E_b = \sigma T^4 = 5,67 \frac{W}{m^2 K^4} \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (2.24)$$

missä σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($\approx 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$) ja T on mustan kappaleen pinnan lämpötila [K]. (Çengel & Ghajar 2011)

Partikkelilla on aina jokin kineettinen energia ja kvanttifysiikan mukaan sillä on taipumus menettää jatkuvasti tätä energiaa siten, että syntyy säteilykvantti, jonka energia on saman suuruinen kuin partikkelin menettämä kineettinen energia. Tätä tapahtuu sekä pinnoilla että aineen sisässä, mutta aineen sisällä emittoituvat fotonit absorboituvat hyvin nopeasti johonkin lähellä olevaan toiseen partikkeliin. (Çengel & Ghajar 2011) Rakennusfysiikassa kiinteiden aineiden oletetaan olevan kuitenkin läpinäkyvättömiä, lukuun ottamatta lasia ja vastaavia selkeästi valoa läpäiseviä materiaaleja. Läpinäkyvättömien kappaleiden säteilyä käsitellään pinnalla tapahtuvana ilmiönä. Säteilyn kohdatessa jonkin materiaalin pinnan, osa säteilystä heijastuu, osa absorboituu materiaaliin ja osa läpäisee sen. Yhtälö 2.25 kuvaa energian säilymislakia säteilyn kohdatessa jonkin pinnan.

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (2.25)$$

missä ρ [-] on heijastuskerroin, α [-] absorptiokerroin ja τ [-] säteilyn läpäisykerroin. Näiden osuuksien suhde vaihtelee samallakin materiaalilla aallonpituuden, lämpötilan ja säteilyn tulokulman muuttuessa. (Hagentoft 2001, Hens 2017) Absorboituvan säteilyn määrä riippuu säteilylähteen lämpötilasta (Çengel & Ghajar 2011).

Läpäisemättömän kappaleen tapauksessa τ saa arvon 0, joten heijastunut ja absorboitunut osuus säteilystä voidaan laskea toistensa avulla kaavan 2.26 mukaan.

$$\rho = 1 - \alpha \quad (2.26)$$

Kaikki todelliset pinnat ovat värillisiä eli niiden absorboivuus riippuu säteilyn aallonpituudesta ja säteilyn suunnasta. Tässä käsitellään kuitenkin todellisia kappaleita joko harminaisina kappaleina eli oletetaan niiden absorboivan ja emittoivan saman verran säteilyä riippumatta aallonpituudesta ja suunnasta tai tyhjinä eli harminaisina pintoina, jotka eivät absorboi ollenkaan säteilyä. (Hens 2017)

Emissiviteetti tarkoittaa pinnan emittoiman säteilyn määrää jaettuna samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen emittoiman säteilyn määrällä. Sama esitetään kaavamuodossa kaavassa 2.27.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.27)$$

missä ε on emissiviteetti [-], E on todellisen kappaleen emittoiman säteilyn teho pinta-alayksikköä kohti [W/m^2] ja E_b on samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen emittoivan säteilyn teho pinta-alayksikköä kohti [W/m^2]. Emissiviteetin arvo on aina välillä 0...1. Mitä suurempi on emissiviteetin arvo, sitä suurempi on kappaleen emittoiman säteilyn määrä. Nyt voidaan kirjoittaa (kaava 2.28) harmaan kappaleen emittoiman säteilyenergian E kaava samoin kuin aiemmin mustalle kappaleelle, mutta lisäämällä yhtälöön emissiviteetti, joka kuvaa mustan ja harmaan kappaleen emittoimien säteilyjen suhdetta kaavan 2.28 mukaan. (Hens 2017)

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.28)$$

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa tehdään usein oletus, että pinnan emissiviteetti on sama kuin sen absorptiokerroin (Hagentoft 2001). Näin voidaan tehdä *Kirchhoffin* lain nojalla (kaava 2.29), joka on johdettu olettamalla pieni kappale suuren isoterminen ontton kappaleen sisälle. Pienemmän kappaleen ollessa termisessä tasapainotilassa suuremman ontton kappaleen kanssa, on pieneen kappaleeseen absorboituvan ja siitä emittoituvan säteilyenergian summan oltava 0. Täten on siis voimassa

$$\varepsilon \sigma T^4 = \alpha \sigma T^4 \quad (2.29)$$

mistä voidaan todeta, että

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.30)$$

Kirchhoffin laki ei päde, mikäli säteilyä emittoivan kappaleen pinnan ja sisempien osien välillä on merkittävä lämpötilaero. (Çengel & Ghajar 2011) Auringon säteilyn absorptiokerroin α_{sol} voi olla merkittävästi erisuuruinen verrattuna saman materiaalin emissiviteettiin, joten pinnoilla, joille kohdistuu auringon säteilyä, emissiviteetin oletaminen yhtä suureksi auringonsäteilyn absorptiokertoimen kanssa on usein mahdotonta. Esimerkiksi punatiilelle $\alpha_{sol} = 0,63$ ja $\varepsilon = 0,93$ tai lumelle $\alpha_{sol} = 0,28$ ja $\varepsilon = 0,97$. (Incropera & DeWitt 1985)

2.4.2 Auringon ja ilmakehän säteily

Auringon emittoima säteily vastaa likimain lämpötilassa 5 780 K olevan mustan kappaleen säteilyä. Auringon säteilyn osuessa Maan ilmakehän yläosaan kohtisuorasti, säteilyn intensiteetti on keskimäärin 1371 W/m^2 , mitä kutsutaan myös aurinkovakioksi (eng. *solar constant*). Auringon säteilyn kohdatessa Maan ilmakehän, osa säteilystä absorboituu tai heijastuu. Säteilyä kohtisuoraan vastaan olevalle pinnalle osuvan säteilyn intensiteetti on pilvettömänä päivänä noin 950 W/m^2 . (Çengel & Ghajar 2011, Incropera & DeWitt 1985)

Säteilyä absorboituu, aallonpituudesta riippuen, O₃-, O₂-, H₂O- ja CO₂ -molekyyleihin sekä ilmakehän pöly- ja aerosolipartikkeleihin. Esimerkiksi otsoni absorboi voimakkaasti UV-säteilyä, mikä suojelee elämää Maassa UV-säteilyn haitallisilta vaikutuksilta. Säteilyä heijastuu kaasumolekyyleistä sekä pöly- ja aerosolipartikkeleista ja vesipisaroista. Noin puolet kaasumolekyyleistä heijastuneesta säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen ja jäljelle jäävä osuus kohdistuu maanpintaan. Maan pinnan heijastumatta kohtaavaa säteilyä kutsutaan suoraksi säteilyksi. Ilmakehän partikkeleista johtuen säteily heijastelee eli siroaa satunnaisesti eri suuntiin tuottaen lopulta maan pinnalle diffuusin säteilyn, jonka intensiteetti on likimain sama kaikkiin suuntiin. Diffuusin säteilyn osuus maan pinnalle tulevasta kokonaissäteilystä vaihtelee 10 %:sta lähelle 100 %:a. Diffuusi ja suora maan pintaan kohdistuva auringonsäteily ovat pääasiassa lyhytaaltoista säteilyä, jonka aallonpituus on noin 0,3...2,5 µm. (Incropera & DeWitt 1985, Çengel & Ghajar 2011)

Auringon suoran ja diffuusin maan pinnalle kohdistuvan säteilyn intensiteettiä kuvataan kaavalla 2.31

$$I_{sol,N} = I_{sol} \cos \beta + I_D \quad (2.31)$$

missä I_{sol} on auringon suoran säteilyn intensiteetti säteitä vastaan kohtisuoralle pinnalle [W/m²] ja I_D on auringon diffuusin säteilyn intensiteetti [W/m²] ja β on auringon korkeuskulma [°].

Ilmakehän säteily (eng. *atmospheric radiation*) on pääasiassa CO₂ ja H₂O-molekyylien emittoimaa pitkäaaltoista säteilyä, jonka aallonpituus on noin 5...8 µm tai yli 13 µm. Tämän säteilyn jakauma ei muistuta mustan kappaleen säteilyä, mutta sitä käsitellään silti usein sellaisena. Oletetaan, että ilmakehä säteilee kuten musta kappale ja lasketaan lämpötila, jolla musta kappale emittoisi vastaavan määrän säteilyenergiaa kuin ilmakehä ja kutsutaan tätä lämpötilaa teholliseksi taivaan lämpötilaksi T_{sky} [K]. Tehollinen taivaan lämpötila vaihtelee noin välillä 230...285 K. (Incropera & DeWitt 1985, Çengel & Ghajar 2011)

Maahan osuvaa taivaan vastasäteilyn intensiteettiä I_{sky} [K] voidaan nyt kuvata seuraavalla kaavalla (2.32) Stefan-Boltzmannin lain mukaan

$$I_{sky} = \sigma T_{sky}^4 \cdot f(p_v) \cdot k_{clouds} \quad (2.32)$$

Missä $f(p_v) \cdot k_{clouds}$ saa arvoja välillä 0,6...0,7 kirkkaalla säällä ja 1,0 täysin pilvisellä säällä ja kuvaa ilmakehän emissiviteettiä, joka riippuu ilman sisältämän kosteuden ja pilvisyyden määrästä.

Pilvisyysskerroin k_{clouds} [-] voidaan määrittellä erilaisista taulukoista. Funktion $f(p_v)$ arvot lasketaan kaavan 2.33 avulla. Pilvisyysskerroimen laskennalle on olemassa erilaisia laskentatapoja ja kaavoja, joista on tässä esitetty yksi.

$$f(p_v) = a - b \cdot 10^{-cp_v} \quad (2.33)$$

Missä a , b , c arvot on määritetty kokeellisesti ($a = 0,79$, $b = 0,254$ ja $c = 0,00052$) ja p_v on vesihöyryn osapaine ilmassa [Pa] (Vinha 2011). Ilmakehän säteily koostuu auringon lyhytaaltoisesta sekä taivaan pitkäaaltoisesta säteilystä kaavan 2.34 mukaan.

$$I_{atm} = I_{sol,N} + I_D + I_{sky} \quad (2.34)$$

Myös maan pinta emittoi pitkäaaltoista säteilyä. Sen aallonpituudet ovat noin välillä $4 \dots 40 \mu m$. Maan pinnan emittoimaa säteilyä kuvataan harmaan pinnan säteilynä kaavan 2.35 mukaan. (Incropera & DeWitt 1985, Çengel & Ghajar 2011) Täysin vastaavasti voidaan käsitellä muidenkin tarkasteltavaa kohdetta ympäröivien pintojen emittoimaa pitkäaaltoista säteilyä.

$$I_{sur} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.35)$$

Missä T_s on maan pinnan lämpötila [K]. Maan pinnalle tuleva kokonaissäteily voidaan nyt ilmaista ilmakehästä tulevan säteilyn ja muualta ympäristöstä emittoituvan säteilyn summana kaavan 2.36 mukaan. (Vinha 2011)

$$I_{tot} = I_{atm} + I_{sur} \quad (2.36)$$

Pinnalta emittoituvaa pitkäaaltoista säteilyä kuvataan harmaan kappaleen säteilynä, kuten maan pinnan emittoimaa säteilyä kaavassa 2.35

$$I_{s,emit} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2.37)$$

Tarkastellaan seuraavaksi kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välistä pitkäaaltoista säteilyä. Pintojen välistä säteilyllä siirtyvää lämpövirtaa kuvataan yksinkertaisella kaavalla 2.38. Koska pinnan ja ympäristön lämpötilat ovat rakennusfysiikassa yleensä suurin piirtein samaa suuruusluokkaa, voidaan kaava myös linearisoida tarkkuuden kärsimättä merkittävästi.

$$q = \varepsilon_1 \sigma T_{sur}^4 - \varepsilon_2 \sigma T_s^4 \approx h_r (T_{sur} - T_s) \quad (2.38)$$

missä h_r on säteilyn lämmönsiirtokerroin [$W/(m^2K)$].

Lämmönsiirtokerroin h_r voidaan laskea kaavalla 2.39

$$h_r = \frac{4\sigma T_{1,2}^3}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2} \frac{A_1}{A_2}} \quad (2.39)$$

missä T_{12} on pintojen 1 ja 2 keskimääräinen lämpötila [K], ϵ_1 ja ϵ_2 ovat tarkasteltavien pintojen emissiviteetit [-], F_{12} on pintojen välinen näkyvyyskerroin [-] ja A_1 sekä A_2 ovat pintojen pinta-alat [m²]. Pintojen keskimääräinen lämpötila lasketaan keskiarvona kaavan 2.40 mukaan. Näkyvyyskertoimien laskemista ei käsitellä tässä työssä.

$$T_{12} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.40)$$

Usein konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimet on rakennusfysiikassa yhdistetty pintavastukseksi, jota käsitellään vakioarvona. Johtumalla seinäpinnan ja ilman välillä siirtyvä lämpömäärä on hyvin pieni säteilyn ja konvektion avulla siirtyvään lämpöön verrattuna, joten se voidaan jättää huomiotta. Esimerkiksi U-arvojen laskentaa varten pintavastuksille annetaan arvoja standardissa SFS-EN ISO 6946:2017. Yhdistetty pintavastus esitetään kaavassa 2.41.

$$h_s = h_r + h_{cv} \quad (2.41)$$

Tapauksessa, jossa tarkastellaan kahden samansuuntaisen ja äärettömän kokoisen pinnan välistä lämmönsiirtoa, kuten rakennuksen seinän ilmapälissä, näkyvyyskerroin saa arvon 1 ja $A_1/A_2 = 1$, jolloin lämmönsiirtokerroimen kaava yksinkertaistuu muotoon

$$h_r = 4\epsilon_{12}\sigma T_{12}^3 \quad (2.42)$$

Kahden samansuuntaisen äärettömän pinnan yhdistetty emissiviteetti ϵ_{12} lasketaan kaavalla

$$\frac{1}{\epsilon_{12}} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \quad (2.43)$$

missä ϵ_1 ja ϵ_2 ovat eri pintojen emissiviteetit. (Hagentoft 2001)

Tässä työssä tarkasteltiin erilaisten ulkoseinäarakenteiden toimintaa. Rakennuksen ulkoseinään kohdistuvan säteilyn vaikutusta kuvattiin seuraavalla yhtälöllä 2.44, jossa otetaan huomioon auringon suora ja diffuusi säteily, maan pinnan ja seinän sekä taivaan ja seinän välinen pitkäaaltoinen säteily. Yhtälöä käytetään COMSOL Multiphysics –laskentaohjelmalla tehtävissä tarkasteluissa tässä työssä, WUFI:ssa säteily-yhtälöt on valmiiksi sisäänrakennettu. WUFI osaa muuntaa vaakapinnalle annetut säteilyintensiteetit automaattisesti seinäpinnalle kohdistuviksi. COMSOL:iin syöttämistä varten vaakapinnan säteilyintensi-

teetit on muunnettava itse pystypinnan arvoiksi eri ilmansuuntiin osoittaville seinille. Pitkääaltoisen säteilyn taseyhtälöt, joissa on tehty muunnos pystypinnalle, on esitetty mallinnuksessa käytettyjen ulkoilman olosuhteiden yhteydessä luvussa 4.2.1. Kaavaan 2.44 syötettävien arvojen tulee siis olla tarkasteltavalle pinnalle kohdistuvia intensiteetti-arvoja.

$$q = \alpha_{sol} \cdot I_{sol} + I_{sur} + \alpha_{lw} I_{sky} - I_{s.emit} \quad (2.44)$$

missä α_{sol} on auringon säteilyn absorptiokerroin [-], α_{lw} on pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokerroin [-], joka oletetaan samaksi kuin pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteetti ϵ_s ja $I_{s.emit}$ on seinärakenteen pinnasta emittoituvan pitkäaaltoisen säteilyn intensiteetti [W/m^2].

2.5 Ilman kosteus

Ilma on useista yhdisteistä koostuva kaasuseos. Tilavuussuhteina se sisältää noin 21 % happea, 78 % typpeä ja loppuosa on hiilidioksidia, vesihöyryä, rikkioksidia, argonia ja ksenonia. (Hens 2017)

Ilman vesihöyrypitoisuus v [kg/m^3] kuvaa vesihöyryn massaa painoyksikössä ilmaa. Vesihöyryn osapaineelle p_v [Pa] voidaan johtaa yleisestä kaasulaista yhtälö, jossa vesihöyryn osapaine riippuu ilman lämpötilasta sekä vesihöyrypitoisuudesta.

$$p_v = 461.4 \cdot (T + 273.15) \cdot v \quad (2.45)$$

missä T on lämpötila [$^{\circ}C$].

Vesihöyryn kyllästyspitoisuus v_{sat} [kg/m^3] kuvaa ilmaan sitoutuvan vesihöyryn maksimimäärää kyseisessä lämpötilassa. Hagentoft (2001) siteeraa saksalaista standardia DIN 4108, joka määrittelee kyllästysvesihöyrypitoisuuden seuraavan kaavan mukaisesti.

$$v_{sat} = \frac{a \cdot \left(b + \frac{T}{100}\right)^n}{461.4 \cdot (T + 273.15)} \quad (2.46)$$

missä T on lämpötila [$^{\circ}C$] ja vakiot a , b ja n

$$\begin{cases} 0 \leq T \leq 30: & a = 288,68 \text{ Pa}; b = 1,098; n = 8,02 \\ -20 \leq T \leq 0: & a = 4,689 \text{ Pa}; b = 1,486; n = 12,3 \end{cases} \quad (2.47)$$

Suhteellinen kosteus φ , RH , [-] määritellään vallitsevan vesihöyrypitoisuuden ja kyllästysvesihöyrypitoisuuden suhteena.

$$\varphi = 100\% \cdot \frac{v}{v_{sat}} \quad (2.48)$$

Jos $\varphi = 100 \% RH$, vesihöyry alkaa kondensoitua eli tiivistyä vedeksi ja vapauttaa samalla energiaa. (Hagentoft 2001)

2.6 Kosteus huokoisissa materiaaleissa

Kosteutta sitoutuu materiaaleihin, joissa on avoimia huokosia, joiden seiniin vesimolekyylit voivat sitoutua. Käsite kosteus sisältää nestemäisen veden, jään ja vesihöyryn. Vesihöyrymolekyylien halkaisija on noin 0,28 nm. Nestefaasissa olevan veden pooliset vesimolekyylit muodostavat ”ryppäitä”, jotka ovat merkittävästi suurempikokoisia. Tästä seuraa se, että avohuokoinen materiaali voi olla vesitiivis, muttei vesihöyrytiivis. Huokoisuus ε_p [% (m^3/m^3)] määrittää materiaalin huokostilavuuden ja kokonaistilavuuden avulla ja kuvaa huokosten osuutta materiaalin kokonaistilavuudesta. (Hens 2017)

$$\varepsilon_p = \frac{V_p}{V_{tot}} \quad (2.49)$$

Missä V_p on huokostilavuus [m^3] ja V_{tot} on materiaalin kokonaistilavuus [m^3].

Kosteuspitoisuus w [kg/m^3] ilmoittaa materiaaliin sitoutuneen veden määrän tilavuusyksikköä kohti. Kosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa myös paino-osina.

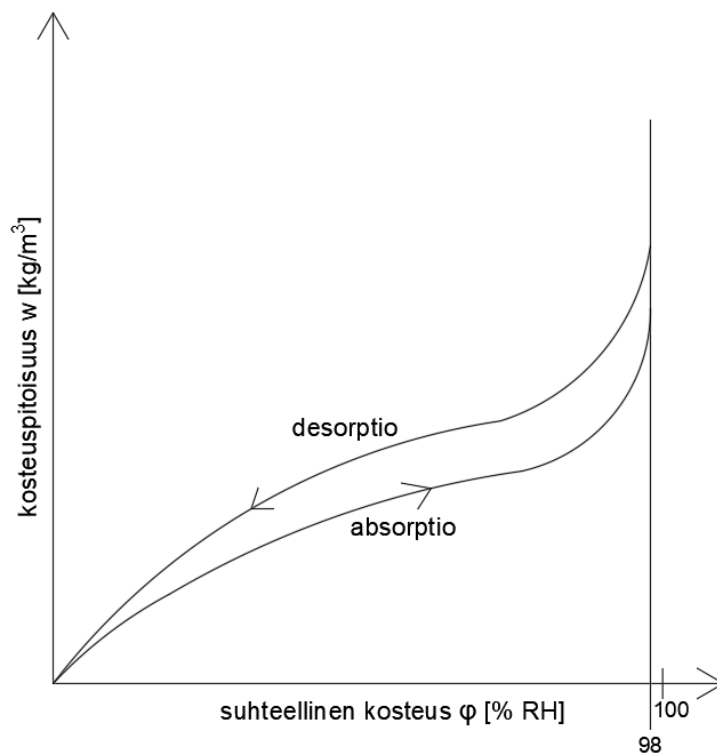
$$u = \frac{w}{\rho_{dry}} \quad (2.50)$$

Missä u on kosteuspitoisuus paino-osina [kg/kg , %] ja ρ_{dry} on materiaalin kuivatiheys [kg/m^3]. Huokoisten materiaalien kosteuspitoisuus w riippuu niistä ympäröivän ilman kosteudesta, sillä erot kosteuspitoisuudessa pyrkivät tasoittumaan materiaalin ja ilman välillä.

Hygroσκοoppisuus tarkoittaa materiaalin kykyä sitoa kosteutta ilmasta (absorptio) ja luovuttaa kosteutta takaisin ilmaan (desorptio). Hygroσκοoppisiksi materiaaleiksi kutsutaan materiaaleja, jotka sitovat kosteutta itseensä jo ilman suhteellisen kosteuden ollessa matala. Sorptiokäyrä eli tasapainokosteuskäyrä kuvaa suhteellisen kosteuden φ funktiona sitä, mihin kosteuspitoisuuteen materiaali lopulta päätyy oltuaan pitkän ajan kontaktissa kosteutta sisältävän ilman kanssa. Tasapainokosteuskäyrä on erilainen jokaiselle materiaalille. Kosteuden sitoutuminen materiaaliin voidaan jakaa hygroσκοoppiseen ja kapillaariseen alueeseen. Hygroσκοoppisella alueella tarkoitetaan olosuhteita, joissa ilman suhteellinen kosteus on korkeintaan 98 % RH. Kapillaarisella alueella suhteellinen kosteus on välillä 98...100 % RH. Hygroσκοoppisella alueella kosteuden sitoutuminen huokosrakenteeseen tapahtuu adheesion ja kapillaarikondenssin avulla. Kun suhteellinen kosteus on matala, vesimolekyylit tarttuvat huokosten seinämiin, koska adheesio vesimolekyylien

ja huokosseinien välillä on voimakkaampi kuin vesimolekyylien väliset vetovoimat (monomolekulaarinen adsorptio). Vesimolekyyliä kerrostuu lisää suhteellisen kosteuden noustessa (polymolekulaarinen adsorptio). (Hens 2017, Hagentoft 2001)

Hydrofiilisissä materiaaleissa alkaa kapillaarikondenssi, kun huokosseinin adsorpoituneet vesimolekyylikerrokset osuvat toisiinsa ja muodostavat koveran ”linssin” huokoseen. Kapillaarinen imu, joka imee lisää vettä huokoseen, aiheutuu sitoutuneen veden pinnan kaarevuudesta yhdessä pintajännityksen kanssa. Imun suuruus riippuu kosteuspitoisuudesta. Jos kyseessä on hydrofobinen materiaali, syntyy kapillaarinen repulsio, joka pyrkii poistamaan vettä huokosesta. Kapillaarikondenssi aiheuttaa nopean kosteuspitoisuuden kasvun materiaalissa jo pienellä suhteellisen kosteuden kasvulla. Kosteasta ilmasta ei voi sitoutua rajattomasti kosteutta huokosiin. Mikäli materiaali on kosketuksissa nestemäiseen veteen, kosteuspitoisuus voi kasvaa vielä merkittävästi kapillaarisuuden vaikutuksesta. Kapillaarisesti kosteutta voi sitoutua kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden w_{cap} verran, mutta tällöin kaikki huokokset eivät vielä ole täyttyneet vedellä, koska huokosiin jää usein myös ilmaa. Jos koko huokostilavuus on täyttynyt vedellä, kosteuspitoisuus on saavuttanut maksimikosteuspitoisuuden w_{max} . (Hens 2017, Hagentoft 2001)



Kuva 2.5 Kuvitteellinen sorptio-desorptiokäyrä hystereesin havainnollistamiseksi.

Hystereesi on ilmiö, joka kuvaa huokoisen materiaalin kastumis- ja kuivumiskäyttäytymisessä tapahtuvaa eroa. Tavallisesti kuivuminen on hitaampaa eli vaikka ilman suhteellinen kosteus on sama, on kuivuvassa materiaalissa yleensä enemmän kosteutta verrattuna

kastuvaan materiaaliin. Ilmiötä kuvataan usein sorptio- ja desorptiokäyrillä. (Hagentoft 2001) Kuvassa 2.5 on havainnollistettu hystereesiä kuvitteellisella sorptio-desorptio-käyrällä. Eri materiaaleille määritettyjä tasapainokosteuskäyriä löytyy esimerkiksi kirjasta RIL 255-1-2014.

2.7 Vesihöyryn diffuusio

Vesihöyryn diffuusio tarkoittaa vesihöyryn pitoisuuserojen tasoittumista vesihöyrymolekyylien sattumanvaraisen liikkeen vuoksi. Tasoittuminen johtuu siitä, että systeemin entropia kasvaa termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan. *Fickin ensimmäinen laki* kuvaa vesihöyryn diffuusion aiheuttamaa diffuusiovirran tiheyttä homogeenisessä ainekerroksessa isotermissä olosuhteissa.

$$g_{diff} = -\delta_v \nabla v = -\frac{D}{\mu} \nabla v \quad (2.51)$$

missä g_{diff} on diffuusiovirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], δ_v on vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmaistuna [m^2/s], v on vesihöyrypitoisuus [kg/m^3], D on seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s] ja μ on diffuusiovastuskerroin [-].

Diffuusiovirran tiheys voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaineiden avulla.

$$g_{diff} = -\delta_p \nabla p_v \quad (2.52)$$

missä δ_p on vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaineen avulla ilmaistuna [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$] ja p_v on vesihöyryn osapaine [Pa].

Materiaalin diffuusiovastus voidaan ilmoittaa joko suhteellisena diffuusiovastuksena s_d [m] tai diffuusiovastuskertoimenä μ [-]. Diffuusiovastuskerroin määritellään kaavan 2.53 kautta.

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_v} \quad (2.53)$$

missä $\delta_{v,a}$ on seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s] ja δ_v on kyseisen materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s].

Suhteellinen diffuusiovastus s_d [m] ilmoittaa, monenko metrin paksuista kerrosta seisovaa ilmaa materiaalikerroksen diffuusiovastus vastaa.

$$s_d = \mu d \quad (2.54)$$

missä d on materiaalikerroksen paksuus [m].

Ohuille materiaaleille, kuten höyrynsulkukalvoille tai maalikerroksille käytetään diffuusiiovastuksen sijaan vesihöyrynvastusta Z_v [s/m], joka kuvaa myös ainekerroksen kykyä vastustaa vesihöyryn kulkua lävitsensä.

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} = \frac{1}{W_v} = \frac{g}{\Delta v} \quad (2.55)$$

missä W_v on vesihöyrynläpäisykerroin [m/s].

2.8 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Hygrooskoopin alueen yläraja on kosteuspitoisuus, johon materiaali voi päätyä sitomalla kosteutta ainoastaan ilmasta. Kriittinen kosteuspitoisuus on raja, jonka alapuolella vesi ei voi siirtyä ulkoisen paineen avulla. Kriittisen kosteuspitoisuuden saavutettuaan kosteusdiffusiviteetti kasvaa merkittävästi, sillä huokosverkostosta tulee yhtenäinen ja kosteudensiirto tehostuu. Kapillaarinen veden virtaus aiheutuu vesimolekyylien ja huokosseinien välisestä adheesiosta sekä veden pintajännityksestä. Huokosseiniä vasten oleva vedenpinta muodostaa koveran linssin ja nousee huokosseiniä ylöspäin, mikäli kyseessä on hydrofiilinen materiaali, ja aiheuttaa kapillaarista imua. Kapillaarinen imu eli alipaine voidaan laskea pyöreälle putkelle alla olevalla kaavalla.

$$p_{cap} = \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos \theta \quad (2.56)$$

missä σ on pintajännitysvakio [N/m], r on putken säde [m] ja θ on kontaktikulma vedenpinnan ja putken reunan välillä [°]. Tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla kontaktikulma on likimain 0°, jolloin $\cos(\theta) \approx 1$. Kapillaarinen imu nostaa vedenpinnan tasoa putkessa, kunnes kapillaarinen imu ja painovoima saavuttavat tasapainon. Kapillaarinen nousukorkeus H_{cap} [m] voidaan laskea pyöreälle putkelle, jolla approksimoidaan huokosmateriaalin huokosta, alla olevalla kaavalla.

$$H_{cap} = \frac{2\sigma}{g \cdot r \cdot \rho_{water}} \quad (2.57)$$

missä g on putoamiskiihtyvyys [m/s²] ja ρ_{water} on veden tiheys [kg/m³]. Kaavasta 2.57 nähdään, että kapillaarinen nousukorkeus riippuu huokosten koosta, pienemmissä huokosissa vesi nousee korkeammalle kuin suuremmissa. Rakennusmateriaaleille kapillaarinen kosteusvirta g_{cap} lasketaan tavallisesti kosteuspitoisuusgradientin avulla.

$$g_{cap} = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.58)$$

missä D_w on kosteusdiffusiviteetti [m²/s], joka kuvaa materiaalin kosteuspitoisuuserojen tasoittumisnopeutta ja lasketaan tavallisesti erikseen höyrydiffuusiolle ja kapillaariselle

siirtymiselle. Mitä suurempi kosteusdiffusiviteetin arvo on, sitä nopeammin kosteuspitoisuus ilman ja materiaalin välillä tasoittuu ilmankosteuden muuttuessa. Kosteusdiffusiviteetti saadaan kaavasta 2.59.

$$D_w = \frac{\delta_v \cdot v_{sat}}{\xi_\varphi} \quad (2.59)$$

missä ξ_φ on materiaalin kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella [kg/m³].

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti D_{ws} saadaan kaavasta 2.60.

$$D_{ws} = D_w - \frac{(\delta_v - \delta_{v,0}) \cdot v_s}{\xi_\varphi} \quad (2.60)$$

missä $\delta_{v,0}$ on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [m²/s], kun $\varphi < 50$ % RH. (Hagentoft 2001)

2.9 Kosteuden konvektio

Ilma siirtyy materiaalien läpi ilmanpaine-erojen vaikutuksesta ja kuljettaa mukanaan kosteutta. Tätä kutsutaan kosteuden konvektioksi. Kosteus voi siirtyä konvektion avulla joko sisältä ulos tai ulkoa sisään päin, riippuen painesuhteista. Konvektion kuljettaessa kosteutta lämpimämmästä sisäilmasta ulospäin, kosteudella on vaarana tiivistyä rakenteen sisälle, jos materiaalin lämpötila on niin matala, että ilmassa saavutetaan vesihöyryn kylästyspitoisuus. Tällaisen kondenssin estämiseksi rakenteen sisäpinnassa on yleensä tiivis kerros, joka estää ilman ja vesihöyryn konvektion.

Konvektiivinen kosteusvirta voidaan laskea kaavan 2.61 avulla kun paine-ero on sisältä ulospäin.

$$g_{conv} = r_a v_{in} \quad (2.61)$$

missä r_a on ilmavirran tiheys huokoisen materiaalin läpi [m³/(m²s)], joka voidaan määrittellä *Darcyn laista*:

$$r_a = -A \frac{k_a}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.62)$$

missä A on tarkasteltavan alueen pinta-ala [m²], k_a on materiaalin ilmanläpäisevyys [m³/(m·s·Pa)] ja μ on ilman dynaaminen viskositeetti [N·s/m²].

3. MENETELMÄT U-ARVON MÄÄRITTÄMISEKSI

Standardissa SFS-EN ISO 7345:2018 määritellään rakennusten ja rakenneosien lämpöteknisen käyttäytymisen kuvaamiseen käytettäviä fysikaalisia suureita. Lämmönvastus R [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] määritellään kaavan 3.1 mukaisesti, kun lämpövirran tiheys q on vakio tarkasteltavalla alueella.

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{q} \quad (3.1)$$

missä T_1 [K] ja T_2 [K] ovat lämpötilat rakenneosan eri puolilla. Lämmönvastus ei ole todellisuudessa vakio, vaan riippuu materiaalien lämpötiloista ja kosteuspitoisuuksista, joten materiaalissa on epälineaarinen lämpötilakenttä. Lämmönvastus, joka voidaan mitata tai laskea, kuvaa vain lämmönvastusta sen hetkisisä olosuhteissa. Vaikka lämmönjohtavuus vaihtelee, lämpövirta pysyy yksiulotteisena ja lämmön siirtyminen tapahtuu pääasiassa johtumalla, kun rakenteessa ei ole ilmakerroksia. Jos rakenteessa on lämpönieluja tai lämmönlähteitä, muuttuu lämmönsiirto rakenteen läpi oleellisesti. Lämpönieluna voi toimia esimerkiksi tuuletusrako tai veden kondensoituminen tai haihtuminen rakenteen sisässä. Homogeenisissa rakenteissa lämpövirta rakenteen läpi on yksiulotteinen ja vakio joka kohdassa rakennetta, mikäli kylmäsiltoja ei ole. (Deconinck 2017)

Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo, U [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] määritellään kaavan 3.2 mukaisesti lämpövirran tiheyden suhteena lämpötilaeroon rakenteen eri puolten välillä.

$$U = \frac{1}{R} = \frac{\Phi}{(T_1 - T_2) \cdot A} = \frac{q}{\Delta T} \quad (3.2)$$

Missä Φ on lämpövirta [W] ja A on tarkasteltavan alueen pinta-ala [m^2], q on lämpövirran tiheys [W/m^2] ja $\Delta T = T_1 - T_2$. (SFS-EN ISO 7345:2018)

U-arvo lasketaan yleensä alaluvussa 3.2 kuvatulla SFS-EN ISO 6946:2017 mukaisella laskentamenetelmällä, jossa ei oteta huomioon esimerkiksi kosteudensiirron vaikutusta materiaalien lämpötekniseen käyttäytymiseen. Tarkempia laskelmia voidaan tehdä SFS-EN ISO 10211:2017 mukaisella menetelmällä käyttäen numeerisia menetelmiä, kuten elementtimenetelmää, hyödyntäviä laskentaohjelmia.

U-arvon tai lämmönvastuksen mittaustavat voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. sekä kenttä- ja laboratoriomittauksiin. Aktiivisissa menetelmissä luodaan keinotekoiset mittaolosuhteet, kuten esimerkiksi hot box -menetelmissä, joissa pyritään säättämään ja ylläpitämään mahdollisimman tarkasti ja tasaisesti lämpötilaeroa rakenteen yli.

Keinotekoisissa olosuhteissa tehtyjen mittausten ongelma on se, että ne eivät kuvaa rakenteen toimintaa todellisissa olosuhteissa. Passiivisissa menetelmissä, kuten yleisessä ISO 9869-1:1994 mukaisessa lämpövirtalevyllä tehtävässä mittauksessa, luotetaan todellisiin olosuhteisiin, jotka vaihtelevat aina ja luovat epävarmuutta mittauksiin, mutta kuvaavat rakenteen toimintaa todellisissa olosuhteissa. Passiivisten mittausten menetelmät ovat kenttäolosuhteissa huomattavasti helpompia toteuttaa. (Deconinck 2017)

Rakenteiden U-arvojen mittaaminen on hyödyllistä monista syistä. Mittauksilla voidaan osoittaa esimerkiksi korjaustyön yhteydessä tehdyn lisäeristyksen toimivuus ja varmistua työn laadusta uudis- tai korjausrakentamisessa vertaamalla työn jälkeen mitattuja ja suunnitelmissa olevia U-arvoja. Energiatodistukset, sertifikaatit sekä esimerkiksi matalaenergiarakennusten taloudellisuustarkastelut perustuvat laskettuun eivätkä todelliseen käyttäytymiseen, joten todellisen suorituskyvyn mittaaminen varmentaisi näiden tarkastelujen luotettavuutta (Asdrubali et al. 2014). Joissain tapauksissa U-arvomittaus voi myös paljastaa rakennusvirheitä paljastamalla kylmäsiltoja tai huonosti asennettuja tai kastuneita materiaaleja (Deconinck 2017, Gemmell et al. 2014). Huonon rakennustyön laatu voi vaikuttaa merkittävästi rakenteen U-arvoon: Deconinck (2017) lainaa väitöskirjassaan aiemmin KU Leuvenissa tehtyä tutkimusta (*Houvenaghel & Hens, Pitched roof with a vapour permeable underlay. Technical report, KU Leuven, Internal Report. Leuven 2003.*) jossa todettiin huonolaatuisen rakennustyön heikentävän harjakaton lämmöneristyskykyä 200...350 % verrattuna huolellisesti rakennettuun kattoon, kun tarkastellaan katon käyttäytymistä suuremmilla tuulennopeuksilla.

On olemassa useita viitteitä (Deconinck 2017, Gemmell et al. 2014, Wingfield et al. 2008) siitä, että rakennusten todellinen energiankulutus ei monissa tapauksissa vastaa laskennallista kulutusta. Osasyynä todellisen ja lasketun energiankulutuksen välisiin eroihin on erityisesti vanhoissa rakennuksissa se, että laskelmien lähtötiedot ovat usein puutteellisia tai vääriä, jolloin mittaamalla rakenteiden todellinen lämmönläpäisy, saadaan luotettavampaa tietoa esimerkiksi korjaussuunnittelun lähtötiedoiksi (Doran 2000). Lucchi (2017), Rye & Scott (2010) sekä Evangelisti et al. (2015) tutkivat eri ikäisten rakenteiden U-arvoja kenttämittauksilla ja totesivat, että erityisesti vanhojen muurattujen seinien tapauksessa laskelmat aliarvioivat usein rakenteen lämmöneristyskykyä. Evangelisti et al. (2015) huomasi eron lasketun ja mitatun U-arvon välillä pienenevän sen mukaan, mitä uudempia rakennuksia tarkasteltiin, minkä voisi ajatella johtuvan paremmin tunnetuista lähtötiedoista. Toisaalta Doran (2000) toteaa 29:lle rakenteelle lämpövirtalevyllä tehtyjen mittausten perusteella, että Britanniassa vuoden 1995 rakennusmääräysten mukaan rakennetuille rakenteille lasketut U-arvot vaikuttavat yliarvioivan lämmöneristyskykyä noin 20 % verrattuna mittaustuloksiin. Mahdollinen syy tälle on rakennustyön epätarkkuudet, sillä laskelmat perustuvat ideaalisesti onnistuneeseen rakentamiseen, vaikka korjaustekijöitä voidaanakin käyttää U-arvon laskennassa. Tosin Doranin raportissa on myös seinärakenteita, joissa mitattu U-arvo oli laskennallista arvoa matalampi. Doran totesi, että laskelmien ja mittausten välinen ero oli suurin seinärakenteissa, joissa on ilmaräily

sekä vinoissa katoissa. Tämä on linjassa sen kanssa, että ISO 9869-1:1994 standardissa kerrotaan yhden yleisimmistä eroista lasketun ja mitatun U-arvon välillä olevan rakenteessa tapahtuva konvektio, jota ei ole otettu huomioon laskelmissa (ISO 9869-1:1994).

Doranin lisäksi Asdrubali *et al.* (2014) tarkastelivat mitattujen ja laskettujen U-arvojen eroja Italiassa kuudella matalan U-arvon ($U = 0,23 \dots 0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$) seinärakenteella käyttäen ISO 9869-1:1994 mukaista U-arvon mittausmenetelmää ja vertasivat mitattuja U-arvoja SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan laskettuihin U-arvoihin. Viidessä tapauksessa kuudesta mitatut U-arvot olivat 15...43 % korkeampia kuin lasketut. Syyksi esitetään materiaalivalmistajien ilmoittamia liian optimistisia lämmönjohtavuuden arvoja, materiaalien lämpötekniikan käyttäytymisen eroja laboratorion ja todellisten olosuhteiden välillä tai asennusepätkätkkuuksia.

Materiaaliominaisuudet, joita laskelmissa käytetään, määritetään yleensä laboratorio-olosuhteissa ja nämä eivät välttämättä kuvaa todellista toimintaa rakenteissa (Deconinck 2017, Gemmell *et al.* 2014). Usein joudutaan myös käyttämään lähtötietoina standardeista otettuja yleistettyjä arvoja. Vanhoista rakennuksista voi olla vaikea tunnistaa materiaaleja tarkasti tai varsinkaan tunnistaa materiaalien kunnon heikentymistä ajan myötä tai niiden kastumista, havaita kylmäsiltoja tai ilmvälejä, jolloin on vaarana käyttää laskelmissa vääriä lähtötietoja (Lucchi 2017). Materiaaleja voidaan tutkia näytteiden avulla, mutta se ei aina anna luotettavia tuloksia, koska esimerkiksi kosteuspitoisuuden ja tiheyden määrittäminen sekä materiaalin tarkka tunnistaminen voi olla hankalaa (Desogus *et al.* 2011). Lisäksi vanhojen muurattujen seinien ominaisuudet voivat vaihdella myös merkittävästi riippuen seinän kohdasta: rakenteissa voi olla erilaisia tiiliä tai ilmataskuja (Lucchi 2017, Rye & Scott 2010).

Termisen massan (eng. *thermal mass*) ja termisen hitauden (eng. *thermal inertia*) määritelmät vaihtelevat paljon eri lähteissä, samoin niiden vaikutukset energiankulutukseen vaihtelevat tutkimuksesta riippuen. Esimerkiksi Peavy *et al.* (1973) totesivat, että lämpövirta massiivirakenteissa voi olla jopa 20 % pienempi kuin mitä laskelmat antavat ymmärtää. Toisaalta Verbeke & Audenaert (2018) tekivät laajan kirjallisuuskatsauksen aiemmin tehtyihin tutkimuksiin, joissa tutkittiin termisen massan vaikutusta energiankulutukseen ja suurin osa kirjallisuudesta kootuista tutkimuksista totesi suuren termisen massan vähentävän energiankulutusta, mutta vaikutus oli monesti hyvin pieni.

Terminen massa voidaan määritellä kaikkien rakenneosien kokonaismassaksi. Pelkkä termisen massan määrä ei riitä kuvaamaan rakenteiden dynaamista käyttäytymistä, sillä myös esimerkiksi rakennekerrosten järjestys sekä energian luovutusnopeus vaikuttavat rakenteen käyttäytymiseen. (Verbeke & Audenaert 2018)

Kontoleon & Bikas (2005) määrittelevät termisen hitauden lämmön luovutus- tai sitomisprosessissa materiaalin lämpenemiskertoimen b [$\text{W} \cdot \text{s}^{1/2}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] avulla jo aiemmin tunnetun kaavan 3.3 mukaan.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho_0 \cdot c_p} \quad (3.3)$$

missä λ on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], ρ_0 on tiheys [kg/m^3] ja c_p on ominaislämpökapasiteetti vakiopainneessa [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$].

Terminen hitaus voidaan rinnastaa kappaleen hitauteen, jolla se vastustaa liiketilansa muutosta. Samoin kappale vastustaa lämpötilan muutosta ja rakennusmateriaaleissa pääasiassa tähän vastustuksen suuruuteen vaikuttaa massa. Terminen hitaus aiheuttaa viiveen sisälämpötilan muutokseen ulkolämpötilan muuttuessa ja myös vaimentaa lämpötilan muutoksia, sillä lämpöenergia siirtyy johtumalla rakenteen läpi, mutta osa lämpöenergiasta sitoutuu rakenteeseen. Sitoutuvan energian määrä riippuu rakenteen ominaislämpökapasiteetista eli tiheydestä ja massasta. Termisen hitauden ansiosta esimerkiksi muuratujen seinien tai muiden massaltaan suurten rakenteiden stationääritilassa laskettu U-arvo ei kuvaa tarkasti rakenteen läpäisevää hetkellistä lämpövirtaa, sillä rakenne kykenee sitomaan paljon lämpöenergiaa. Termisen hitauden hyödyntäminen voi auttaa vähentämään rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarvetta ja siten energiankulutusta. Erityisesti syksyllä ja keväällä terminen hitaus voi auttaa pitämään rakennuksen sisäilmaston sopivana, kun lämpöä sitoutuu rakenteisiin lämpimänä vuorokauden aikana ja vapautuu yöllä. Toisaalta rakenteiden lämmittäminen tai jäähdyttäminen oikeaan lämpötilaan kestää kauemmin kuin sisäilman lämpötilan muuttaminen, joten rakenteet saattavat luovuttaa tai sitoa lämpöä ei-toivottuna aikana, mikä voi heikentää asumismukavuutta. (Verbeke & Audenaert 2018)

Terminen viive ϕ (eng. *thermal phase lag*) kertoo kuinka kauan lämmöllä kestää kulkeutua materiaalin läpi (Ulgen 2002). Ilmiö on kuvattu kuvan 3.1 osassa b. Vasemmalla ulkoilmassa tapahtuva lämpötilanmuutos A_e (sininen viiva) tapahtuu viiveellä ϕ sisätilassa A_i (oranssi viiva) pienempänä. Terminen viive lasketaan kaavan 3.4 mukaan. Vaimennuskerroin f (eng. *decrement factor*) kuvaa rakenteen toisella puolella tapahtuvan lämpötilan muutoksen suuruutta verrattuna vastakkaisen puolen lämpötilanmuutokseen. Ilmiötä on kuvattu kuvan 3.1 osassa a. Vasemmalla eli ulkopuolella tapahtuva lämpötilanmuutos A_e tapahtuu sisäpuolella pienempänä A_i , koska seinä varastoi ja luovuttaa lämpöä. Pieni kerroin tarkoittaa, että rakenne vaimentaa lämpötilan muutosta paljon ja suuri taas sitä, että lämpötila muuttuu lähes saman verran kummallakin puolella rakennetta. (Verbeke & Audenaert 2018)

$$\phi = t_{Ti,min} - t_{Te,min} \quad (3.4)$$

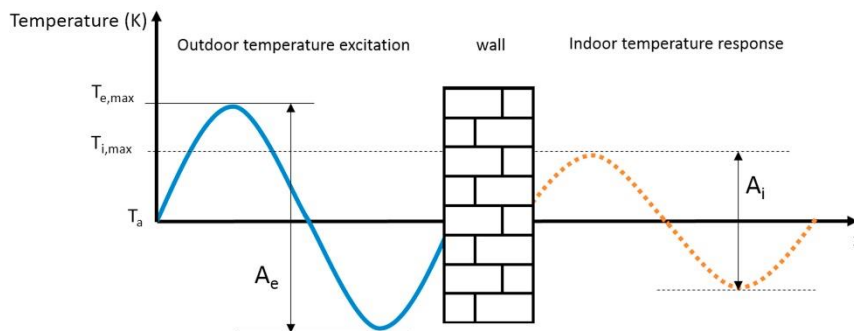
missä $t_{Ti,min}$ [h] on hetki, jolloin sisälämpötila on pienimmillään ja $t_{Te,min}$ [h] on hetki, jolloin ulkolämpötila on pienimmillään. Sama kaava voidaan ilmaista myös hetkien kautta,

jolloin ulkona ja sisällä on maksimilämpötilat. Vaimennuskerroin voidaan määrittää kaavan 3.5 mukaan.

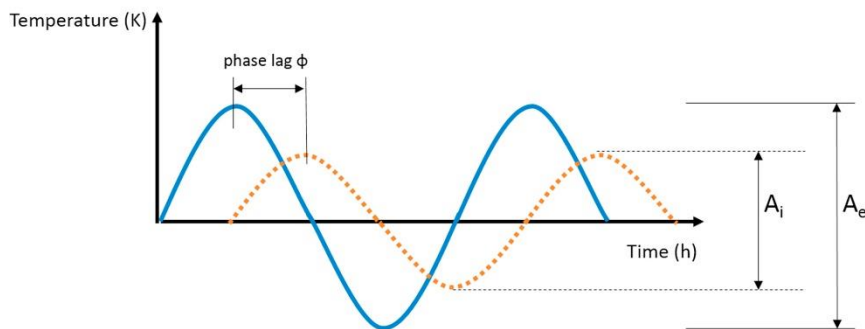
$$f = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_{e,max} - T_{e,min}} \quad (3.5)$$

missä $T_{i,max}$ [°C] on suurin sisälämpötila, $T_{i,min}$ [°C] on pienin sisälämpötila, $T_{e,max}$ [°C] on suurin ulkolämpötila, $T_{e,min}$ [°C] on pienin ulkolämpötila.

(a)



(b)



Kuva 3.1 Termisen hitauden vaikutukset: vaimennuskerroin (osa a) ja terminen viive (osa b) (Verbeke, Audenaert 2018).

Rakenteen eristeiden paksuudella ja sijoittelulla on vaikutusta sekä termiseen viiveeseen että vaimennuskertoimeen, kuten Asan (1998) osoitti. Eristepaksuuden kasvattamisella saadaan aikaan pieni vaimennuskerroin ja raskaammalla rakennekerroksella, kuten muurauksella, saadaan taas kasvatettua termistä viivettä (Kontoleon & Bikas 2005). Yleensä sellaista viivettä pidetään optimaalisena, joka siirtää sisälämpötilan nousun viileämpään yöaikaan, jolloin rakenne luovuttaa varastoimaansa lämpöä sisäilmaan ja vähentää lämmitystarvetta (Kontoleon & Eumorfopoulou 2008).

Reilly & Kinnane (2017) tutkivat termisen massan vaikutusta rakennusten energiankulutukseen vertaamalla stationäärisiä ja epästationäärisiä laskelmia. He esittivät useamman uuden suureen käyttöönottoa, joista tässä esitetään yksi, tehollinen U-arvo. Tehollinen U-arvo kuvaa rakenteen lämpöteknistä käyttäytymistä valitun tarkastelujakson aikana, jonka kesto on n tuntia.

$$U_{eff} = \frac{\sum q}{\Delta \bar{T} \cdot \Delta t} \quad (3.6)$$

Missä $\Delta \bar{T}$ on keskimääräinen ulko- ja sisälämpötilojen ero $\Delta \bar{T} = \bar{T}_e - \bar{T}_i$ [°C] tarkastelujakson aikana ja $\Delta t = t_2 - t_1$ [h] eli tarkastelujakson pituus tunteina. Kevyelle rakenteelle, jolla ei ole juurikaan termistä massaa, U-arvo ja tehollinen U-arvo ovat lähellä tai hyvin lähellä toisiaan. Samoin on, mikäli kyseessä on terminen tasapainotila. Pohjois-Irlannissa sijaitsevan rakennuksen energiankulutusmallinnusten mukaan dynaamisen käyttäytymisen ottaminen huomioon eristerapatulle tiili-eriste-tiili –seinälle osoitti, että todellisen lämpöhäviön mukaan laskettu tehollinen U-arvo oli yli 2,5-kertainen stationääritilassa laskettuun U-arvoon verrattuna. Lämpöä tarvitaan aina yön jälkeen lämmittämään rakenne, joka on jäähtynyt yön aikana ja koska rakenteella on paljon lämpökapasiteettia, kuluu tähän ylimääräistä energiaa. Myös analysoimalla yksiaineista rapattua betoniharkkoseinää ennen ja jälkeen lisäeristystä todettiin, että tehollinen U-arvo oli ennen eristämistä noin 2-kertainen ja eristämisen jälkeen 3-4 –kertainen verrattuna stationääritilan U-arvoon. Ilmastossa, jossa rakennuksia pääasiassa jäähdytetään ja lämpötila vaihtelee vuorokauden ajan mukaan sisälämpötilan molemmiin puolin, termisen massan vaikutukset energiankulutukseen olivat energiankulutusta pienentäviä, massiivisella seinällä vaikutus oli suurempi kuin kevyellä. (Reilly & Kinnane 2017)

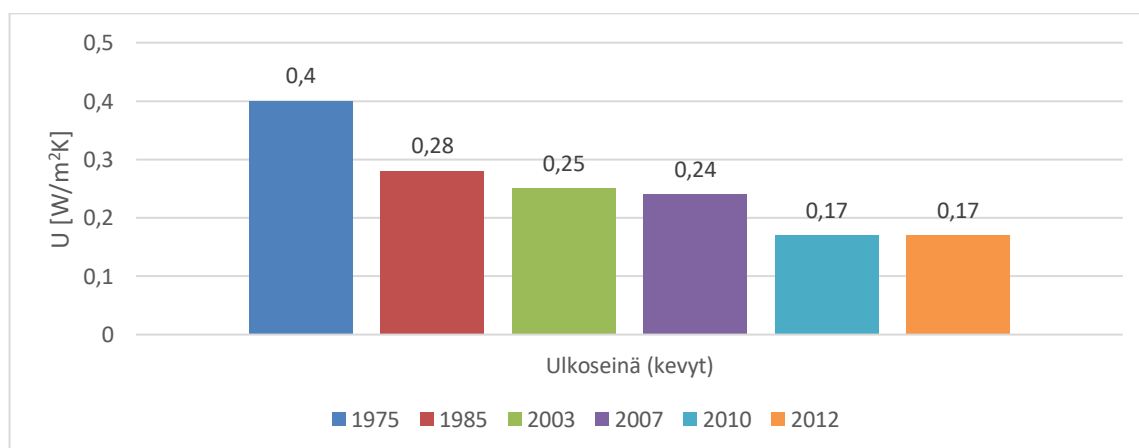
Kuitenkin Kalema *et al.* (2008) totesivat tutkimuksessaan, että myös pohjoismaissa sijaitsevilla hyvin eristetyissä rakennuksissa termisellä massalla on positiivisia vaikutuksia. Suuri terminen massa vähensi selvästi jäähdytysenergian tarvetta ja hieman myös lämmitysenergian tarvetta tässä tutkimuksessa, tosin lämmitysenergian tarve väheni alle 5 %. Termisen massan hyödyt korostuivat, jos ikkunapinta-ala oli suuri, 20...45 % lattiapinta-alasta. (Kalema *et al.* 2008) Myös Vanessa *et al.* (2016) mukaan Alaskan sääoloissa suuren termisen massan aikaansaama säästö tavanomaisen asuinrakennuksen kokonaislämmitysenergiasta on vain noin 1 %.

Lindberg *et al.* (2012) tutkivat seinärakennetta, jossa on kantava tiilistä muurattu sisäkuori, mineraalivillaeriste, tuulensuojalevy, tuuletusväli ja kuorimuuri 4 vuoden mittausajanjakson ajan testirakennuksen avulla. Tutkimuksessa laskettiin SFS-EN ISO 6946:2017 mukaisen U-arvon avulla lämpöhäviöt ulko- ja sisäilman keskilämpötilojen avulla (metodi 1) ja sekä lämpöhäviö eristekerroksen molemmiin puolin mitatuista lämpötiloista mineraalivillan lämmönjohtavuuden avulla (metodi 2). Tiilikuoren lämpötila muuttuu säteilyn vaikutuksesta huomattavasti enemmän kuin ulkoilman lämpötila, joten tiilikuori myös pysyy merkittävästi lämpimämpänä kuin ulkoilma pitkälle iltaan vuoden

kylmimpänäkin aikana. Lämpökapasiteetin vaikutukset olivat selkeät: metodilla 2 laskettu lämpöhäviö oli maaliskuussa 18...55 % pienempi eteläpuoleisella seinällä verrattuna metodiin 1, jossa käytettiin ilman lämpötiloja. Kesä-heinäkuussa metodilla 2 laskettu lämpöhäviö oli jopa vain 10...20 % metodilla 1 lasketusta häviöstä. Pohjoisseinälläkin ero oli selkeästi havaittava, vaikkakin pienempi. Lindberg *et al.* (2012) mukaan lämpöä varastoivan ulkokuoren lämpöhäviöitä pienentävä vaikutus on merkittävä pohjoismaissa. Ilman lämpötiloista lasketuista U-arvoista määritetyt lämpöhäviöt ovat todellisen suuruista tutkituilla rakenteilla vain marras-tammikuussa, jolloin auringon säteilyn vaikutus on lähes olematon. Muu osa vuodesta lämpöhäviöitä yliarvioidaan. (Lindberg *et al.* 2012)

3.1 U-arvon määrittäminen taulukoiden avulla

Joissain tapauksissa rakennusten tai rakenneosien lämpöteknistä käyttäytymistä voidaan tarkastella karkealla tasolla erilaisten aikakaudelle ja rakennustyyppille ominaisten U-arvojen kautta. Tämä voi olla tarpeellista esimerkiksi tehtäessä alustavia tarkasteluja vanhoille rakennuksille, joista ei ole olemassa piirustuksia tai muita suunnitelmia. Tällaisten rakennusten rakenteista ja materiaaleista ei ole välttämättä mitään muuta tietoa, kuin mitä voidaan silmäämääräisesti nähdä. Tyyppirakennusten avulla voidaan yrittää määrittää, mitä rakenteet voisivat mahdollisesti olla, mikäli rakennus on aikakaudelleen tyypillinen. Suomessa eri aikakausien tyyppirakennuksia ja yleisiä rakenteita U-arvoineen on koottu ainakin Energiatodistusopas 2016 liitteeseen 1 (ympäristöministeriö 2016). Samassa asiakirjassa on myös koottuna aiempien jo kumottujen rakennusmääräysten määräystasot eri rakenneosien U-arvoille, joita voidaan myös käyttää apuna rakennuksen lämpöteknisen toiminnan arvioimisessa, mikäli muuta tietoa ei ole saatavissa. Kuvassa 3.2 on esitetty lämpimän tilan ulkoseinien U-arvon määräystason kehitys eri vuosikymmeninä Suomessa.



Kuva 3.2

Lämpimän tilan ulkoseinän U-arvon määräystason kehitys vuosina 1975-2012 Suomessa (mukaihen ympäristöministeriö 2016).

Energiatodistusoppaan liitteessä korostetaan, että todelliset materiaalit tulisi aina varmentaa omin havainnoin eikä luottaa sokeasti taulukkoarvoihin. Tällaiset tyyppirakennukset ja tyypillisten U-arvojen taulukot ovat aina yleistyksiä. Myös Ficco *et al.* (2015) korostaa tyyppirakennuksiin tai muihin vastaaviin yleistyksiin perustuvan U-arvojen arvioinnin olevan usein hyvin epätarkkaa. Lämpötekniikan toiminnan arviointi määräystasojen tai varsinkin suositustasojen pohjalta on ongelmallista, sillä määräystaso on minimivaatimustaso. Lisäksi U-arvoista on ollut Suomessa vain suosituksia ennen 1970-lukua ja poikkeuksia määräystasoon voidaan tehdä perustellusti. Rakenteisiin on voitu myös tehdä muutoksia esimerkiksi korjausten yhteydessä tai näiden toiminta on voinut muuttua esimerkiksi materiaalien vanhenemisen tai kastumisen takia.

3.2 U-arvon laskeminen SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan

Tässä luvussa käsitellään U-arvon laskemista standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan. Standardi SFS-EN ISO 6946:2017 käsittelee rakenneosien U-arvon ja lämmönvastuksen laskentaa, pois lukien ovet, ikkunat, lasitukset, kaksoisjulkisivut, ilmaa läpäiseviksi suunnitellut sekä maahan yhteydessä olevat rakenneosat. Laskentamenetelmä soveltuu homogeenisistä kerroksista koostuville rakenneosille ja sen lisäksi standardissa esitetään likimääräiseen laskentaan sopiva yläraja-alaraja -menetelmä epähomogeenisista kerroksista koostuville rakenneosille. Tarkempaan laskentaan tulee käyttää SFS-EN ISO 10211:2017 mukaisia numeerisiin simulointeihin perustuvia laskentamenetelmiä. Standardissa SFS-EN ISO 6946:2017 on lisäksi esitetty taulukoituja arvoja ilmakerrosten, ullakkotilojen ja lämmittämättömien tilojen lämmönvastuksille. Liitteissä selostetaan esimerkiksi menetelmät pintavastusten ja ilmakerrosten sekä paksuudeltaan lineaarisesti vaihtelevien rakennekerrosten lämmönvastusten määrittämiseksi. (SFS-EN ISO 6946:2017)

Laskenta perustuu lämmönjohtavuuden tai lämmönvastuksen suunnitteluarvoihin. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo λ määritellään standardin SFS-EN ISO 10456:2008 mukaisesti. Suunnitteluarvo ottaa huomioon ikääntymisen, kosteusolosuhteiden ja sisäisen konvektion vaikutukset materiaalin lämmönjohtavuuteen. (SFS-EN ISO 10456:2008) Materiaaliominaisuudet voidaan ottaa SFS-EN ISO 10456:2008 -standardista, käyttää valmistajien ilmoittamia arvoja tai määrittää materiaaliominaisuudet laboratoriokokeilla. Standardeista tai vastaavista taulukoista otettujen arvojen ongelma on se, että ne kuvaavat aina jotain tyypillisiä materiaaleja, eivätkä mitään tiettyä tuotetta. Usein materiaaliominaisuudet on ilmoitettu standardeissa vaihteluvälinä, josta olisi osattava valita kyseessä olevaa todellista materiaalia vastaava arvo. Mikäli kyseisestä materiaalista on saatavilla laboratoriossa testattuja arvoja, tulisi niitä käyttää aina kun mahdollista (Vinha 2014).

Käsitellään seuraavaksi tarkemmin yksinkertaistettua U-arvon laskentamenetelmää. SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskentamenetelmä olettaa, että rakenne on stationäärיתי-

lassa eli ulko- ja sisälämpötilat ovat vakioita, joten lämpövirta rakennekerroksissa muuttuu lineaarisesti. Pistemäiset metalliset kylmäsilat voidaan ottaa huomioon korjaustermillä, mutta jos rakenteessa on muita metallisia kylmäsiltoja, on käytettävä SFS-EN ISO 10211:2017 mukaista tarkempaa menetelmää. Eri kerrosten lämmönvastukset yhdistetään kokonaislämmönvastukseksi laskemalla ne yhteen ja lisäämällä summaan pintavastukset. U-arvo lasketaan kokonaislämmönvastuksen käänteislukuna. Lopuksi lasketaan mahdolliset korjaustermit ja lisätään ne laskettuun U-arvoon, jos niiden yhteisösuus on yli 3 % korjaamattomasta U-arvosta. (SFS-EN ISO 6946:2017)

Homogeeniselle rakennekerrokselle lämmönvastus R [$\text{m}^2\text{K/W}$] lasketaan kaavan 3.7 mukaan:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.7)$$

missä d on rakennekerroksen paksuus [m] ja λ on rakennekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]. Homogeenisista kerroksista koostuvan rakenteen kokonaislämmönvastus R_{tot} lasketaan summaamalla yhteen eri kerrosten lämmönvastukset ja pintavastukset kaavan 8 mukaan

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (3.8)$$

missä R_{si} on sisäpinnan pintavastus [$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$], R_{se} on ulkopinnan pintavastus [$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$] ja R_n on rakennekerroksen n lämmönvastus [$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$]. Sisä- ja ulkopinnan pintavastusten laskelmissa yleisesti käytettävät arvot eri suuntaisille lämpövirroille saadaan taulukosta 3.1.

Taulukko 3.1 Tavanomaiset laskelmissa käytettävät pintavastukset (Mukaillen SFS-EN ISO 6946:2017 taulukko 7).

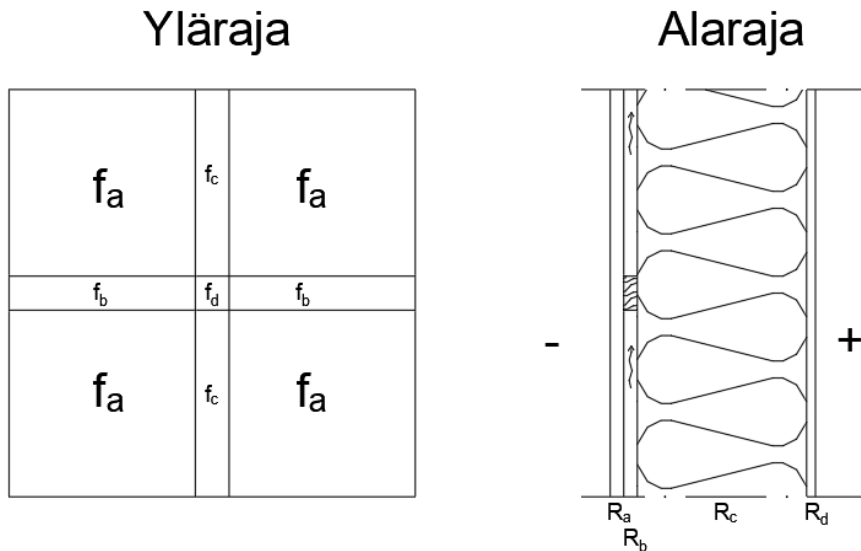
Pintavastus [$\text{m}^2\text{K/W}$]	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Lämmönläpäisykerroin U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] lasketaan kokonaislämmönvastuksen käänteislukuna kaavan 3.9 mukaan.

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (3.9)$$

3.2.1 Lämmönvastuksen ylä- ja alaraja-arvot

Ylä- ja alarajamenetelmässä tarkasteltava komponentti jaetaan lämpöteknisesti homogeenisiin osiin. Menetelmällä voidaan tarkastella rakenteita, joissa on epähomogeenisiä homogeenisiin osiin jaettavissa olevia kerroksia. Kuvassa 3.3 esitetään rakenteen jakaminen lohkoihin yläraja-alaraja -menetelmän käyttöä varten.



Kuva 3.3 Esimerkki seinärakenteen jakamisesta homogeenisiin lohkoihin (vas.) ja kerroksiin (oik.) yläraja-alarajamenetelmässä.

Lämmönvastuksen ylärajaa laskettaessa komponenttia tarkastellaan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorassa. Komponentti jaetaan lämpöteknisesti erilaisiin lämpövirran suuntaisiin lohkoihin f_n ja lasketaan näiden lohkojen suhteelliset pinta-alat sekä kokonaislämmönvastukset $R_{tot;n}$. Komponentin kokonaislämmönvastuksen yläraja lasketaan yhdistämällä eri lohkojen lämmönvastukset kaavan 3.10 avulla.

$$\frac{1}{R_{tot;upper}} = \frac{f_a}{R_{tot;a}} + \frac{f_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{f_n}{R_{tot;n}} \quad (3.10)$$

Lämmönvastuksen alaraja lasketaan tarkastelemalla lämpövirran suuntaan nähden kohtisuoria kerroksia. Jokaiselle epähomogeeniselle kerrokselle lasketaan ekvivalentti lämmönvastus R_n yhdistämällä kerroksen eri materiaalien lämmönjohtavuuksien ja kerrospaksuuksien avulla lasketut lämmönvastukset R_{jn} ja eri materiaalien suhteelliset pinta-alat f_n kerroksessa n kaavan 3.11 avulla.

$$\frac{1}{R_n} = \frac{f_a}{R_{an}} + \frac{f_b}{R_{bn}} + \dots + \frac{f_n}{R_{jn}} \quad (3.11)$$

Tämän jälkeen yhdistetään eri kerrosten ekvivalentit lämmönvastukset R_n kokonaislämmönvastuksen alarajaksi kaavan 3.8 avulla.

Kokonaislämmönvastus yläraja-alarajamenetelmällä saadaan kaavan 3.12 avulla eli laskemalla keskiarvo eri menetelmillä saaduista lämmönvastuksista.

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;upper} + R_{tot;lower}}{2} \quad (3.12)$$

Ehtona yläraja-alarajamenetelmän käytölle on, että kaavan 3.13 ehdon on täyttyvä.

$$\frac{R_{tot.upper}}{R_{tot.lower}} \leq 1,5 \quad (3.13)$$

3.2.2 U-arvon korjaustermit ja korjattu U-arvo

Tässä alaluvussa esitetyillä korjaustermeillä voidaan korjata U-arvoa ottamalla huomioon ilmarakojen, mekaanisten kiinnikkeiden ja käännetyin katon vaikutuksia U-arvoon. Ilmaraoilla tarkoitetaan tässä tahattomasti erilaisista rakennustyöhön ja materiaaleihin liittyvistä epätarkkuuksista syntyneitä ilmarakoja, jotka ovat joko eristetilaan jääneitä ilmatiloja, eristelevyjen väliin jääneitä rakoja tai eristeen ja ympäröivän rakenteen välisiä rakoja. Ilmaraot voivat lisätä lämmönsiirtoa rakenneseosan läpi lisäämällä konvektiolla tai säteilemällä siirtyvän energian määrää. Vain koko eristepaksuuden lävistävät ilmaraot aiheuttavat niin suuren lisäyksen lämmönsiirtoon, että korjaustermi on tarpeellinen. Eristeen asentaminen useaan kerrokseen ja saumojen limittäminen parantaa tilannetta niin, ettei korjaustermiä tarvita. Ilmarakojen korjaustermi ΔU_g lasketaan kaavan 3.14 mukaan. Kaavassa esiintyvä korjaustermi $\Delta U''$ [W/(m²·K)] valitaan sen mukaan, aiheuttavatko ilmaraot ilman vapaata kiertoa eristeen kylmän ja lämpimän puolen välillä vai eivät. Korjaustermien arvot valitaan standardin SFS-EN ISO 6946:2017 taulukosta F.1.

$$\Delta U_g = \Delta U'' \cdot \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2 \quad (3.14)$$

missä R_1 on ilmarakoja sisältävän kerroksen lämmönvastus, R_{tot} on rakenneseosan kokonaislämmönvastus ja $\Delta U''$ ilmarakojen korjaustermi,

Mekaanisten kiinnikkeiden korjaustermiä voidaan käyttää eristekerroksen lävistäville pistemäisille kiinnikkeille, joiden lämmönjohtavuus on vähintään 1,0 W/(m·K). Korjaustermiä mekaanisille kiinnikkeille ei saa soveltaa tilanteissa, jossa mekaaninen kiinnike on molemmista päistään kiinni metallilevyssä tai muuraussiteet lävistävät tyhjän ilmatilan.

Mekaanisten kiinnikkeiden korjaustermi voidaan laskea kahdella menetelmällä joko kaavan 3.15 tai 3.16 mukaan.

$$\Delta U_f = n_f \cdot \chi \quad (3.15)$$

missä n_f on kiinnikkeiden lukumäärä per neliömetri ja χ [W/(m·K)] on SFS-EN ISO 10211:2017 mukainen pistemäinen lämmönjohtavuus.

Toinen tapa laskea korjaustermi mekaanisille kiinnikkeille on SFS-EN ISO 6946:2017 liitteen F3.2 mukainen kaava 3.16.

$$\Delta U_f = \alpha \cdot \frac{\lambda_f \cdot A_f \cdot n_f}{d_1} \cdot \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2 \quad (3.16)$$

missä α on kaavan 3.17 mukainen kiinnikkeen tunkeumakerroin [-], λ_f on kiinnikkeen lämmönjohtavuus [W/(m·K)], A_f on kiinnikkeen poikkileikkauksen pinta-ala [m²], n_f on kiinnikkeiden määrä per neliömetri, d_1 on eristekerroksen lävistävän kiinnikkeen pituus [m], R_1 on eristekerroksen lämmönvastus [m²K/W] ja R_{tot} on rakenneosan kokonaislämmönvastus [m²K/W].

$$\alpha = 0,8 \cdot \frac{d_1}{d_0} \quad (3.17)$$

missä d_0 on eristekerroksen kokonaispaksuus [m].

Käännetty katto tarkoittaa rakennetta, jossa vedeneriste on lämmöneristeen alapuolella ja siten lämmöneriste on jatkuvasti märissä olosuhteissa. Korjaustermi ottaa huomioon veden virtaamisen vedeneristeen ja lämmöneristeen välissä. Korjaustermi soveltuu XPS:llä eristetyille lämmitetyille käännettyille katoille ja lasketaan kaavan 3.18 mukaan.

$$\Delta U_r = p \cdot f \cdot x \cdot \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2 \quad (3.18)$$

missä p on lämmityskauden keskimääräinen sademäärä [mm/d], f on kuivatuskerroin, joka kuvaa osuutta sademäärästä p , joka saavuttaa vedeneristeen, x on vedeneristeen päällä virtaavan veden aiheuttamaa lämpöhäviöiden lisääntymistä kuvaava kerroin [(W·d)/(m²·K·mm)], R_1 on vedeneristeen päällä sijaitsevan lämmöneristeen lämmönvastus ja R_{tot} on koko rakenteen lämmönvastus. Tulolle $f \cdot x$ voidaan käyttää vakioarvoa 0,04, joka johtaa suurimpaan mahdolliseen korjauskertoimeen. Tällöin oletetaan, että eriste on yhdessä kerroksessa puskusaumoin ja että eristeen päällä on avoin kerros, kuten sorakerros. Muita arvoja voidaan käyttää, jos ne on dokumentoitu riippumattomissa lähteissä.

Korjaustermit summataan kaavan 3.19 mukaisesti. Korjaustermien summaa ΔU verrataan ilman korjauksia laskettuun U-arvoon. Jos korjaustermien yhteenlaskettu summa on yli 3

% korjaamattomasta U-arvosta, on U-arvoa korjattava kaavan 3.20 mukaisesti lisäämällä alkuperäiseen U-arvoon korjaustermien summa.

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (3.19)$$

$$U_c = U + \Delta U \quad (3.20)$$

missä U_c on korjattu U-arvo, jossa on otettu huomioon korjaustermien vaikutus.

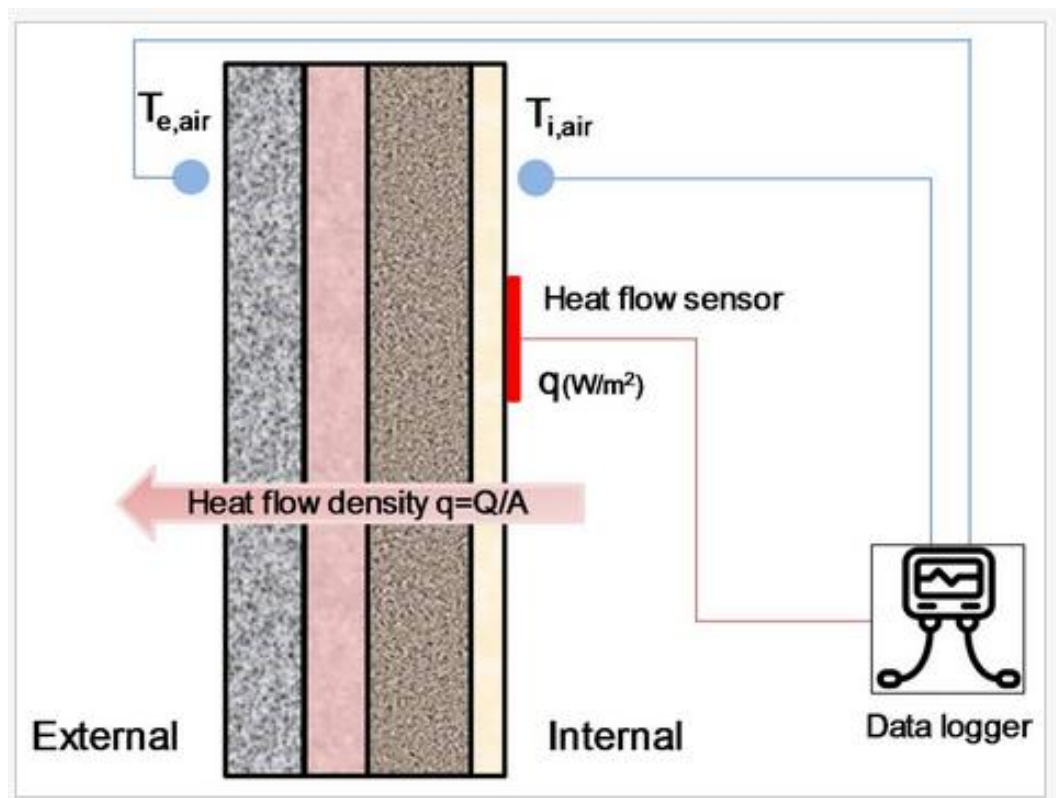
3.3 U-arvon kenttämittaukset ISO 9869-1:1994 mukaan

Kansainvälinen standardi ISO 9869 vuoden 2018 päivitetty versio sisältää 2 osaa: 1. osa käsittelee rakenneosien U-arvon määrittämistä lämpövirtalevyn avulla ja 2. osa U-arvon määrittämistä lämpökameralla tehtävien mittausten avulla. Kuten aiemmin on todettu, todellisissa olosuhteissa mikään rakenneosa ei ole termisessä tasapainotilassa vaan lämpötilajakauma ja lämpövirta rakenneosassa muuttuu jatkuvasti. Tästä syystä U-arvon mittaamiseksi on joko luotava keinotekoisesti riittävän stationääriset olosuhteet mittauksen suorittamiseksi, tehtävä pitkäkestoisia mittauksia ja oletettava, että riittävästä määrästä mittaushetkiä saadaan laskettua luotettava tulos esimerkiksi keskiarvona tai käytettävä monimutkaisempia dynaamisia menetelmiä mittaustietojen analysointiin, jolloin lämpötilan ja lämpövirran vaihtelut tulevat otetuksi huomioon. (ISO 9869-1:1994)

Yleensä lämpökameraa käytetään kvalitatiivisiin tarkasteluihin SFS-EN 13187:2001 tai RT 14-11239:2016 mukaan joko rakentamisen laadunvalvontaan tai olemassa olevien rakennusten kunnon tarkastamiseen. Lämpökuvauksella voidaan havaita rakenneosien lämpövuotokohdat, kylmäsiltojen sijainti ja olemassaolo, ilmavuodot tai eristyspuutteet. Myös kosteusvaurioiden havaitseminen on mahdollista. (Rakennustieto Oy 2016) Viime vuosina on alettu tutkia käyttöä myös kvantitatiivisiin tarkasteluihin. Standardia SFS-EN ISO 9869-2:2018 ei ollut saatavilla tätä työtä kirjoitettaessa, sillä se on julkaistu vasta vuonna 2018, joten sen sisältämää kuvausta lämpökameralla tehtävästä U-arvon määrittämisestä ei käsitellä tässä työssä.

Standardin ISO 9869-1:1994 mukainen U-arvon määrittäminen perustuu rakenteen läpäisevän lämpövirran mittaamiseen lämpövirtalevyn (eng. *HFM*, *heat flow meter*) avulla. Lämpövirtalevy on yleensä ohut hyvin lämpöä johtava levy, joka tuottaa sähköistä signaalia, joka on lämpövirran funktio. Lisäksi mitataan rakenteen pintalämpötilat molemmiin puolin rakennetta sekä ulko- ja sisäilman lämpötilat. U-arvo määritetään joko mitaustuloksista laskettujen U-arvojen keskiarvona tai käyttäen erilaisia dynaamisia menetelmiä. Lämpövirtalevyllä voidaan tehdä mittauksia tasomaisille, pääosin läpinäkyvyyttä sisältäville rakenteille, joissa lämpövirran suunta on rakenteen pintaa vastaan kohtisuorassa. (ISO 9869-1:1994)

Esimerkki mittausjärjestelyistä on esitetty kuvassa 3.4. Kuvassa rakenteen sisäpuoli on oikealla ja ulkopuoli vasemmalla. Mittaus toteutetaan asentamalla lämpövirtalevy kiinni rakenteen sisäpintaan sekä lämpötilasensorit rakenteen molemmin puolin. Mittauskohta on valittava siten, että lähellä ei ole kylmäsiltoja, mikä varmistetaan lämpökuvaamalla standardin SFS-EN ISO 6781:1983 mukaan. Lisäksi mittauskohdan on oltava riittävän kaukana lämmönlähteistä, jäähdyttimistä, tuulettimista sekä muista häiriötekijöistä. Rakenteen ulkopinta on suojattava sateelta sekä auringon säteilyltä ja selkeällä säällä varjostettava, jottei pitkäaaltoinen taustasäteily vaikuta tuloksiin liikaa. Lämpövirta sekä lämpötilat rakenteen molemmin puolin mitataan kokonaisina vuorokausina ja tallennetaan yleensä 0,5 h tai 1,0 h välein, yhteensä vähintään 72 h ajan. (ISO 9869-1:1994)



Kuva 3.4 ISO 9869-1 mukainen U -arvon mittausjärjestely (Kim, Kim et al. 2018).

Mittausdataa käsitellään joko keskiarvomenetelmällä tai erilaisilla dynaamisilla menetelmillä. Keskiarvomenetelmässä oletetaan, että U -arvo saadaan riittävän pitkän ajanjakson mittautulosten keskiarvona. Jokaisesta mittautuloksesta lasketaan U -arvo ja seurataan, suppeneeko laskettu U -arvo kohti jotain arvoa. Keskiarvomenetelmällä saadaan U -arvolle likiarvo, jos rakenne ei sido tai luovuta merkittäviä määriä lämpöä mittauksen aikana (alle 5 % lämpövirran suuruudesta), materiaalien lämmönjohtavuudet ja kosteuspiitoisuudet pysyvät vakioina eikä lämpövirtalevy altistu auringon säteilylle. Jos rakenneosan sisältämä lämpömäärä muuttuu merkittävästi, on käytettävä standardissa esitettyä lämpökapasiteetin huomioon ottavaa menetelmää tai dynaamista menetelmää. U -arvo

lasketaan keskiarvomenetelmässä eri mittaushetkien mittaustuloksista laskettujen U-arvojen keskiarvona kaavan 3.21 mukaan. (ISO 9869-1:1994)

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (3.21)$$

missä q_j on lämpövirran tiheys [W/m^2] hetkellä j , T_{ij} on sisälämpötila [$^{\circ}\text{C}$] hetkellä j ja T_{ej} on ulkolämpötila [$^{\circ}\text{C}$] hetkellä j .

Keskiarvomenetelmää käytettäessä mittaus voidaan lopettaa, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

1. Mittaus on kestänyt vähintään 3 vrk
2. Viimeisin laskettu U-arvo poikkeaa korkeintaan 5 % vuorokautta aiemmasta
3. U-arvo laskettuna lopun aikajaksolta t_{test} [d] ei poikkeaa enempää kuin 5 % testin alun samanmittaiselta ajanjaksolta lasketusta U-arvosta. Vertailuajanjaksojen pituudet määritellään kaavalla 3.22.

$$t_{test} = N \left(2 \cdot \frac{1}{3} D_t \right) \quad (3.22)$$

missä N on positiivinen kokonaisluku, D_t on mittauksen kesto [d]. Jos kyseessä on kevyt rakenneos, jonka ominaislämpökapasiteetti neliometriä kohti on korkeintaan $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$, mittaukset suositellaan tehtäviksi yöllä 1 h auringon laskun jälkeen, mutta ennen auringon nousua. Mittaus voidaan lopettaa, kun 3:n peräkkäisen yön tuloksista lasketut U-arvot eivät poikkeaa toisistaan yli 5 %. (ISO 9869-1:1994)

ISO 9869-1:1994 liitteessä B kuvataan dynaamista mittausdatan käsittelymenetelmää. Dynaaminen menetelmä on hienostunut menetelmä, joka ottaa huomioon lämpötilan muutokset lämpöyhtälöä hyödyntämällä. Useiden tutkimusten mukaan (Deconinck 2017, Atsonios et al. 2017, Gaspar et al. 2016, Deconinck & Roels 2016) dynaamiset menetelmät antavat tarkempia tuloksia kuin keskiarvomenetelmä, erityisesti kun lämpötilaero on pieni, jolloin keskiarvomenetelmä ei anna luotettavia tuloksia kohtuullisessa ajassa. On olemassa muitakin dynaamisia menetelmiä, kuin ISO 9869-1:1994 liitteessä B kuvattu menetelmä, ja joitain näistä käsitellään esimerkiksi lähteessä Deconinck (2017). Dynaamisia mittausdatan käsittelymenetelmiä ei käsitellä tässä työssä.

ISO 9869-1:1994 mukaan lämpövirtalevyllä tehdyn U-arvomittauksen kokonaisvirhe on 14...28 %. Virhe koostuu mittalaitteiden virheistä (virhe 5 % hyvin kalibroituna), dataloggerien virheistä, lämpövirtalevyn toiminnallisesta virheestä (virhe oikein korjattuna 2...3 %), lämpövirtalevyn kontaktihäiriöistä ja asennusvirheistä (virhe 5 %) sekä lämpötilojen ja lämpövirran vaihteluista (virhe 10 %) mittauksen aikana. Suuri mahdollisuus mittausvirheille on silloin, kun ilman lämpötilat vaihtelevat paljon ennen mittausta tai sen

aikana. Erityisesti sisälämpötilan muutokset häiritsevät mittausta. Massiivisten rakenteiden mittaamiseen tulisi varata riittävän pitkä mittausaika tai suurten mittausvirheiden vaara kasvaa. Samoin auringon säteilyä ja muiden lämpölähteiden vaikutusta tulisi välttää. Lämpövirtalevyn toiminnallinen virhe tulisi myös määrittää ja korjata, koska se voi olla korjaamattomana jopa 30 %. Toiminnallinen virhe käsittää mm. lämpövirtalevyn aiheuttaman seinän lämpötilakentän vääristymisen vaikutuksen sekä lämpövirtalevyn lämmönvastuksen vaikutuksen, mikäli lämpötilaa ei mitata lämpövirtalevyn ja seinän välistä. (ISO 9869-1:1994)

Yleisimmät syyt, jotka aiheuttavat eroa SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan lasketun ja ISO 9869-1:1994 mukaan mitatun U-arvon välille listattuna standardin ISO 9869-1:1994 mukaan ovat:

- Laskelmissa on käytetty väärää materiaaliominaisuuksia, erityisesti eristeillä
- Kosteuden vaikutusta esimerkiksi lämmönjohtavuuteen ei ole otettu huomioon laskelmissa
- Lämpötilan vaikutusta lämmönjohtavuuteen ei ole otettu huomioon
- Laskelmissa on käytetty pintavastuksille väärää arvoja
- Laskelmissa on käytetty väärää dimensioita
- Mittaukset tehtiin huonoissa olosuhteissa
- Mittaukset ja laskelmat eivät koske samaa kohtaa epähomogeenisessä rakenteessa
- Lämpövirta ei ole riittävän yksiulotteinen
- Rakenteessa tapahtuu konvektiota, jota ei ole otettu huomioon laskelmissa
- Rakenteessa tapahtuu faasimuutoksia, joita ei ole otettu huomioon laskelmissa
- Mitatut lämpötilat (eng. *ambient temperature*) eivät ole todenmukaisia

Mittausten vaadittua kestoa pidentää pieni lämpötilaero. Lämpötilaeron ollessa alle 10 °C, mittausten luotettavuus heikkenee mittausteknisistä syistä (Desogus et al. 2011). Gaspar *et al.* (2018) mittasivat matalan U-arvon, $U = 0,27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, seinärakennetta käyttäen keskiarvomenetelmää ja totesivat, että lämpötilaeron ollessa alle 13 °C, mittauksen vaadittu kesto oli 7 vrk. Mikäli lämpötilaero oli yli 19 °C, riitti 3 vrk mittausaika. Mittausten perusteella Gaspar *et al.* (2018) suosittelevat hyvin eristetyille rakenteille vähintään 10 °C lämpötilaeroa mittausten aikana. Ficco *et al.* (2015) mittasivat 7:n eri rakenteen U-arvoja lämpövirtalevyillä. He päättelivät, että mikäli rakenteella on suuri terminen hitaus, tai lämpötilaero on alle 10 °C, on mittausaikaa pidennettävä, ja muutenkin kevyiden rakenteiden mittaus antoi luotettavampia ja toistettavampia tuloksia verrattuna raskaisiin rakenteisiin. Ficco *et al.* (2015) totesivat myös, että pieni lämpövirta tai lämpövirran suunnan vaihtuminen kesken mittauksen aiheutti epäluotettavia tuloksia.

Eri kirjallisuuslähteiden (Asdrubali et al. 2014, Ahmad et al. 2014, Desogus et al. 2011, Ficco et al. 2015) mukaan suuret reunaehdot (auringon säteily, tuulen nopeus, ulko- ja sisälämpötilat) muutokset vaikuttavat merkittävästi lämpövirtalevyn avulla saataviin mitaustuloksiin. Mikäli suuria lämpötilavaihteluita esiintyy, mitattu lämpövirta ja lämpötilat

eivät kuvaa todellisuutta, sillä lämpövirta ja lämpötilat muuttuvat rakenteen toisella puolella viiveellä, joka riippuu termisestä hitaudesta. Auringon säteilyn vaikutus voidaan minimoida valitsemalla mitattavaksi rakenteeksi pohjoisen puoleinen seinä, jolloin mittaukset ovat luotettavampia. (Nicolajsen 2005)

Doran (2000) mittasi 29:n eri tyyppisen seinärakenteen U-arvot Isossa-Britanniassa ISO 9869-1:1994 mukaisella menetelmällä. Doran toteaa, että rakenteet, joissa on paljon termistä massaa eristeen sisäpuolella, vaativat pidemmän mittausajan kuin kevyet rakenteet. Sisä- ja ulkoilman lämpötilan vaihtelut vaikuttivat myös kevyitä rakenteita enemmän raskaiden rakenteiden U-arvon mittaustuloksiin. Rakenteissa, joilla on korkea terminen massa, sisä- ja ulkolämpötilan vaihtelut aiheuttivat merkittäviä muutoksia lämpövirran suuruudessa ja sen suunnassa, erityisesti hyvin eristetyissä tiili-eriste-tiili –rakenteissa. Termisen massan suuri määrä vaikeutti mittauksia ja ISO 9869-1:1994 mukaista termisen massan korjausmenetelmää oli käytettävä. (Doran 2000)

Seinän suuntauksella on vaikutusta mittaamalla saatavaan U-arvoon: Ahmad *et al.* (2014) tutkivat itään ja pohjoiseen osoittavien identtisten seinärakenteiden U-arvoja lämpövirta-levyjen avulla ja havaitsivat, että itäsivulta mitatut U-arvot olivat keskimäärin 37,3 % korkeampia kuin pohjoissivulta mitatut. Tämä johtuu heidän mukaansa siitä, että aurinko paistaa itäsivulle kauemmin kuin pohjoissivulle ja lisää näin lämpövirtaa seinärakenteen läpi. Lämmönvastuksessa ei ollut merkittävää eroa, sillä se laskettiin käyttämällä seinän pintalämpötiloja, jolloin auringon säteilyn lämmittävä vaikutus tuli otettua huomioon. Mittaukset tehtiin kesällä, jolloin ulkoilman lämpötila oli jatkuvasti sisäilman lämpötilaa korkeampi. (Ahmad et al. 2014) Näiden tulosten perusteella voisi päätellä, että kun on lämmityskausi, tapahtuisi vastakkainen reaktio eli lämpövirta olisi pienempi siellä mihin auringon säteilyä kohdistuu enemmän.

Standardissa ISO 9869-1:1994 ei ole määritelty tarkasti, minkälaista mittalaitteistoa U-arvon mittauksiin on käytettävä, vaan esitetään ainoastaan vaatimuksia, jotka mittalaitteiston ja mittausdatan käsittelyn on täytettävä. Ainakin sveitsiläinen greenTEG on kehittänyt ISO 9869-1:1994 vaatimusten mukaisen käyttäjäystävällisen mittalaitteiston, joka mittaa lämpövirran ja ilman lämpötilat molemmiin puoliin rakennetta ja sisältää valmiin analysointiohjelmiston. Järjestelmästä on saatavissa myös monikanavainen langaton versio, jolla mittausdataa voidaan seurata reaaliaikaisesti pilvipalvelun kautta. greenTEGin gO Measurement-System kykenee tekemään mittauksia samanaikaisesti 16 sensorilla, joista osa voi olla kosteusantureita. Laitteisto mittaa rakenteen pintalämpötilan ja ilman lämpötilan kummaltakin puolelta rakennetta sekä lämpövirran toiselta puolelta. (greenTEG 2018a, greenTEG 2018b)

3.4 Muita U-arvon kenttämittausmenetelmiä

Kirjallisuudesta löytyy useita U-arvon kenttämittauksiin ehdotettuja menetelmiä paljon käytetyn ISO 9869-1:1994 mukaisen mittausmenetelmän lisäksi. Mittaukseen on ehdotettu erilaisia rakenteen läpäisevää lämpövirtaa lisääviä hot box-menetelmiä (Scarpa et al. 2017, Meng et al. 2015), lämpöpulsseihin perustuvia menetelmiä (Rasooli et al. 2016), pelkästään rakenteen ja ilman lämpötiloihin (Kim et al. 2018, Andújar Marquez et al. 2017) tai synteettisiin lämpötiloihin (Peng & Wu 2008) perustuvia menetelmiä. Lisäksi kirjallisuudesta löytyy lukuisia erilaisia lämpökuvausta hyödyntäviä mittausmenetelmiä (Fokaides & Kalogirou 2011, Albatici & Tonelli 2010, Albatici et al. 2015, Tejedor et al. 2017). Näiden lisäksi esimerkiksi Sørensen (2010) esittelee valmista helposti siirrettävää ja nopeaa U-arvon mittalaitetta.

Hot box –menetelmissä rakenteen jompaakumpaa pintaa lämmitetään suuremman ja vaakaamman lämpövirran aikaansaamiseksi rakenteen läpi. Näin saadaan lyhennettyä mittausaikaa, tehtyä mittauksia myös luonnollisen lämpötilaeron rakenteen yli ollessa pieni sekä parannettua mittaustarkkuutta. Meng *et al.* totesi suorittamiensa mittaustensa perusteella, että tulokset heidän esittämällään SHB-HFM –menetelmällä olivat lähempänä suunnitteluarvoja, kuin ISO 9869-1:1994 mukaisella menetelmällä. SHB-HFM eroaa laboratoriossa käytettävästä guarded hot box –menetelmästä (ISO 8990:1996) siten, että SHB-HFM ei tarvitse suurta hyvin eristettyä laatikkoa, riittää että laitteella saadaan aikaan riittävä lämpötilaero. U-arvon laskemiseksi mitataan lämpövirtalevyllä rakenteen läpäisevän lämpövirran tiheys ja tämän lisäksi lämpötilat rakenteen molemmin puolin, joko rakenteen pinnoilta tai ilmasta, riippuen menetelmästä. Scarpa *et al.* esittämässä menetelmässä lämpövirtalevy asennetaan lämmitettävän laatikon sisälle, Meng *et al.* esittämässä menetelmässä taas vastakkaiselle puolelle seinää verrattuna lämmitettävään laatikkoon. (Scarpa et al. 2017, Meng et al. 2015)

EPM (eng. *Excitation Pulse Method*) on Rasooli *et al.* (2016) esittämä U-arvon kenttämittausmenetelmä, jossa rakenteen sisäpintaan kohdistetaan lineaarinen lämpöpulssi, ja mitataan lämpövirta sekä molempien rakenteen pintojen lämpötilat. Rasooli *et al.* saivat jo 1,5 h mittausajalla tuloksia, jotka poikkesivat alle 2 % ISO 9869-1:1994 mukaan mitattusta U-arvosta. ISO 9869-1 mukainen mittaus kesti yli 2 viikkoa. EPM-menetelmässä joudutaan kuitenkin ratkaisemaan differentiaaliyhtälöitä tulosten saamiseksi eikä lämpöpulssien luomiseksi ole vielä olemassa automatisoitua laitetta. (Rasooli et al. 2016)

Kim *et al.* (2018) esitti ASTR-menetelmän (eng. *Air-Surface Temperature Ratio*), jonka avulla U-arvo voidaan määrittää mittaamalla sisä- ja ulkoilman sekä sisäpinnan lämpötilat. Menetelmä perustuu siihen, että lämpövirta sisäilmasta seinään on sama kuin lämpövirta seinän läpi ulos. Tutkimuksessaan Kim *et al.* vertailivat ISO 9869-1:1994 mukaan mitattua U-arvoa ja ASTR-menetelmällä laskettua U-arvoa neljälle rakenteelle. ASTR-

menetelmällä yhden yön mittauksen perusteella saadut U-arvot olivat lähes aina 5 % sisällä ISO 9869-1:1994 mukaan mitatuista arvoista, mikäli lämpötilaero oli riittävä ja eivätkä lämpötilat vaihdelleet liikaa.

Tanskalainen Sørensen on patentoinut uudentyyppisen U-arvon mittalaitteen (ks. kuva 3.5), jolla on mahdollista mitata ikkunoiden, ovien ja muiden kevyiden rakenneosien U-arvo alle minuutissa. Raskaille rakenteille mittalaite ei sovi niiden termisen massan suuruuden vuoksi. Mittaukset tehdään rakennuksen ulkopuolelta ja mittauksessa otetaan huomioon konvektion, säteilyn ja johtumisen kautta siirtyvä lämpö. Lisäksi on mitattava sisätilan lämpötila, joka syötetään laitteeseen U-arvon laskemiseksi. (Sørensen 2010)



Kuva 3.5 Tanskalainen U-arvon mittalaite käytössä (Sørensen 2010).

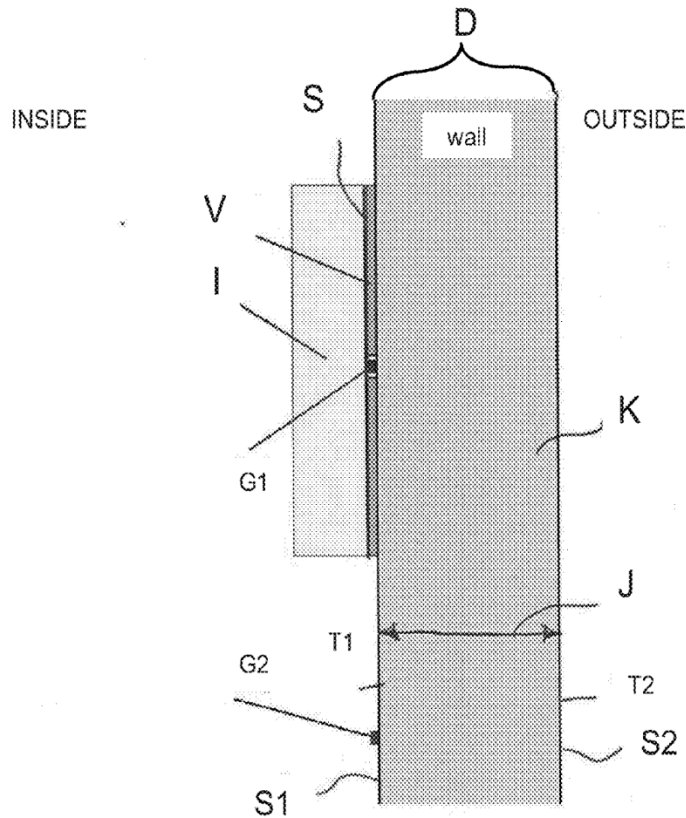
3.5 Arcadassa kehitetty nopea U-arvon mittalaite

Helsingissä sijaitseva Arcada-ammattikorkeakoulu on kehittänyt uudentyyppisen U-arvon mittaamiseen tarkoitetun mittalaitteen. Laitteen kehittämisen syynä on ollut nykyisten mittaustapojen hankaluus, kalleus sekä hitaus. Arcadassa kehitetyn nopean U-arvon mittalaitteen tarkoituksena on kyetä mittaamaan rakenteiden U-arvoja nopeasti eli noin tunnissa, riippuen rakenteesta. Kuvassa 3.6 on nopean U-arvon mittalaitteen esittelykuva.



Kuva 3.6 Nopean U-arvon mittalaitteen salkku (Arcada 2019).

Nopean U-arvon mittalaitteen mittaussuomenetelmän periaate on kuvattu kuvassa 3.7 tarkas-
telemalla kuvitteellista rakennetta (K), jonka paksuus on D ja sillä on sisäpinta (S1) ja
ulkopinta (S2). Tässä selostuksessa mittaussuomenetelmasta oletetaan, että ulkopinnan läm-
pötila (T2) on matalampi kuin sisäpinnan lämpötila (T1). Mittalaite koostuu yhdestä mit-
talaiteyksiköstä, jonka rungon (S), koko on noin 10x10x4 cm, sekä siihen kiinnitetystä
pintalämpötila-anturista (G1). Lisäksi tarvitaan lämpötila-anturi, jolla mitataan rakenteen
ulkopinnan lämpötila (T2) ja ulkoilman lämpötila, lämpökamera, tuulimittari sekä sätei-
lymittari auringon säteilyn mittaamista varten. Mittalaitesalkussa on myös rakennetun-
nistin. Mittalaitteessa on tehokas lämmöneriste (I), jonka ansiosta mitattavan rakenteen
sisäpinta (S1), johon mittalaite kiinnitetään, alkaa jäähtyä, kun mittalaite asennetaan.
Laite vertaa mittalaitteen takaa rakenteen sisäpinnasta (G1) mittaamaansa lämpötilaa re-
ferenssianturin (G2) antamaan lämpötilalukemaan ja säättää laitteeseen integroitua läm-
mitysvastusta (V) siten, että laitteen takaa mitattu lämpötila saavuttaa saman arvon kuin
referenssianturin kohdalla. Mittalaite tallentaa käytetyn lämmitystehon sekä mitatun sei-
nän sisäpinnan lämpötilan laitteen takana ja referenssianturin kohdalla eri ajanhetkillä.
Mittaus loppuu, kun laite tulkitsee tasapainotilan vallitsevan eli lämmitystehon pysyneen
vakiona riittävän kauan. (Paronen & Skön 2017, Paronen et al. 2018)



Kuva 3.7 Nopeat U -arvon mittalaitteen mittaussuomenetelmän kuvaus (Paronen, Skön 2017).

Laitteen toiminta perustuu oletukseen, että rakenne on termisesti tasapainossa eli lämpötila rakenteen yli muuttuu lineaarisesti ja että lämpövirta on yksiulotteinen. Yksiulotteisuuden vaatimuksesta seuraa se, että mittaukset on tehtävä rakenteen kohdasta, jolla rakenteessa ei ole kylmäsiltoja tai muita lämpövirtaan vaikuttavia epähomogeenisia kohtia. Laitteen sijoittelussa on käytettävä apuna lämpökuvausta ja rakennetunnistinta, jotta voidaan valita edustava kohta rakenteesta (Paronen, Biström et al. 2018). Koska mittaus on pistemäinen, ei mittausulos kerro rakenneosan todellista U -arvoa vaan mittauskohdaksi valitun kohdan U -arvon. Tästä syystä laitteen käyttäjän on osattava valita mittauspisteet ja tulkittava tuloksia oikein yleistettävien tulosten saamiseksi. Tekemällä useita mittauksia voidaan rakenneosan kokonaislämmönläpäisykerrointa arvioida keskiarvona tai pintalojen suhteessa. Kylmäsiltojen vaikutukset on mahdollista ottaa huomioon laskennallisesti esimerkiksi käyttäen taulukkoarvoja.

U -arvon laskenta mittaustuloksista perustuu siihen, että oletetaan laitteen tehokkaan eristeen eristävän mittauspiste (G1) riittävän hyvin ympäristöstään, ettei ympäristöstä siirry merkittävää määrää lämpöä laitteen eristeen läpi mittauspisteeseen. Pistettä jäähdyttää rakenteen läpi ulos johtuva lämpövirta (J) ja lämmittää mittalaitteen lämpövastuksen (V) tuottama lämpö. Niinpä oletetaan lämpövastuksen tuottaman lämpömäärän vastaavan täysin sitä lämpövirtaa, joka mittausaikana johtuu mitattavan rakenteen läpi mittalaitteen

kohdalta tilanteessa, jossa mittalaitteen takana olevan pisteen (G1) ja referenssianturin (G2) välinen lämpötilaero on olematon. Kun lämmitysteho ja molemmat rakenteen sisäpinnasta mitatut lämpötilat ovat olleet riittävän saman suuruiset tarpeeksi kauan, mittaus loppuu. Kun ulkoilman ja rakenteen sisäpinnan lämpötilat tunnetaan, voidaan U-arvo laskea mitatun lämmitystehon avulla. Tuulen ja auringon säteilyn vaikutusta voidaan korjata laitteen ohjekirjan mukaisilla korjauskertoimilla. (Paronen et al. 2018, Paronen & Skön 2017)

Mittalaitteen etuihin kuuluu mittauksen nopeus ja siten myös edullisuus verrattuna nykyisiin käytössä oleviin menetelmiin, kuten ISO 9869-1:1994 mukaiseen lämpövirtalevyjä hyödyntävään mittaustapaan. Tämän lisäksi laite on pieni eli helposti siirrettävä eikä sen asentaminen vaadi mittavia järjestelyjä mitattavalla kohteella. Koska laite pyrkii pitämään seinärakenteen takanaan vakio lämpötilassa, laitteen aiheuttama vääristymä seinän lämpötilakenttään on myös hyvin pieni.

Laitteen käyttöön liittyy myös rajoitteita: ainakin tämän hetkiselä mittalaitteella vaatimus lämpövirran suuruudesta (vähintään $3,0 \text{ W/m}^2$) rajoittaa laitteen käyttöä hyvin eristetyissä rakenteissa sääoloihin, joissa lämpötilaero rakenteen yli on riittävän suuri (ks. kuva 5.2 (Arcada 2019)). Lisäksi mittausta edeltäneillä sääolosuhteilla on suuri merkitys mittaustulosten tarkkuuteen, kuten kaikissa mittausten menetelmissä, jotka olettavat mitattavan rakenteen olevan termisessä tasapainotilassa. Sääolosuhteiden tarkkailu ennen mittauksen tekemistä ja sen aikana on tästä syystä välttämätöntä, jotta voidaan varmistua siitä, että rakenne on todella termisessä tasapainossa. Rakenteen täytyy olla riittävän lähellä termistä tasapainotilaa, jotta mittaustulokset voivat olla luotettavia.

4. LASKENNALLISET TARKASTELUT

Laskentatarkastelut toteutettiin ajasta riippuvina lämpö- ja kosteusteknisinä mallinnuksina COMSOL Multiphysics -ohjelmalla. COMSOL:in käyttöön päädyttiin, sillä MATLAB:ia voidaan käyttää sen suorittaman laskennan ohjaamiseen sekä mallien luomiseen ja muokkaamiseen, mikä mahdollistaa laskelmien automatisoinnin ohjelmoinnin avulla. Alustaviin mallinnuksiin käytettiin myös WUFI-laskentaohjelmaa, jotta varmistuttiin COMSOL-mallien soveltuvuudesta tämän työn tarkasteluihin. Koska hetkellisestä lämpövirran mittaustuloksesta laskettu näennäinen U-arvo on usein epätarkka arvio termisen hitauden aiheuttaman ulko- ja sisälämpötilojen muutoksissa ilmenevän viiveen takia (Deconinck 2017), on syytä tarkastella rakenteiden käyttäytymistä ajasta riippuvilla mallinuksilla ja etsiä sellaisia olosuhteita, joissa mittaus voidaan luotettavasti suorittaa.

Laskentatarkastelujen lopputuloksena saatiin lukuisten muiden tulosten ohella lämpövirran tiheys rakenteen sisäpinnalla sekä tämän avulla laskettu näennäinen U-arvo ja rakenteen ulkopinnan lämpötila kaikille rakenteille tunnin välein. Lämpövirran tiheyden ja siitä lasketun näennäisen U-arvon perusteella määritettiin, olisiko U-arvo mitattavissa tällä hetkellä vai ei vertaamalla saatua näennäistä U-arvoa stationääritilassa laskettuun U-arvoon sallimalla jokin poikkeama ja ottamalla huomioon mittalaitteen vaatimus lämpövirran suuruudesta. Laskemalla mitattavissa olevien ajanhetkien lukumäärät yhteen kuukausittain tai vuosittain, voitiin tehdä karkea arvio siitä, mihin vuodenaikaan jonkin seinärakenteen mittaaminen on tai ei ole todennäköisesti mahdollista. Tarkastelemalla eri ilman-suuntiin suunnattuja rakenteita eri vuodenaikoina, voitiin myös havainnoida auringon säteilyn ja viistosateen vaikutuksia U-arvoon.

4.1 Laskentaohjelmat ja elementtimenetelmä

Monia fysiikan ajasta ja paikasta riippuvia ilmiöitä kuvataan osittaisdifferentiaaliyhtälöillä. Näiden yhtälöiden analyttinen ratkaiseminen on monissa tapauksissa mahdotonta ilman merkittävää tarkasteltavan ilmiön tai systeemin yksinkertaistamista, joten analyttisen ratkaisemisen sijasta käytetään erilaisia numeerisia menetelmiä. Alkuperäisiä osittaisdifferentiaaliyhtälöitä kuvataan jonkinlaisella diskreetillä numeerisella mallilla, jonka ratkaisu approksimoi alkuperäisen osittaisdifferentiaaliyhtälön ratkaisua. (COMSOL 2017b)

Elementtimenetelmä (eng. FEM, *Finite Element Method*) on eräs numeerinen menetelmä, jota käytetään osittaisdifferentiaaliyhtälöiden approksimaatioiden ratkaisemiseen. Elementtimenetelmän hyödyllisyyden huomasi ensimmäisenä saksalais-amerikkalainen matemaatikko *Richard Courant* 1940-luvulla. Elementtimenetelmän käytön yleistyminen

kesti kuitenkin vielä vuosikymmeniä. Elementtimenetelmässä systeemi jaetaan äärelliseen määrään pieniä elementtejä. Systeemillä tarkoitetaan yleensä fyysistä objektia, joka voi koostua yhdestä tai useammasta materiaalista, esimerkiksi tässä työssä systeemi on jokin pala seinärakennetta. Elementtien muoto on yleensä yksinkertainen, kuten kolmio tai nelikulmio kaksiulotteisessa mallissa ja kuutio tai tetraedri kolmiulotteisessa mallissa. Elementtien reunojen rajaviivoja nimitetään solmuviivoiksi tai tasoiksi ja näiden leikkauspisteitä solmuiksi (eng. *nodes*). Elementtien muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan elementtiverkoksi (eng. *mesh*). (Chapra & Canale 1998, Burnett 1987, COMSOL 2017b)

Jokaiselle elementille systeemissä luodaan elementtiyhtälöt koko systeemin käyttäytymistä hallitsevaista differentiaali- tai integraalimuotoisista yhtälöistä. Nämä elementtiyhtälöt approksimoivat alkuperäisiä yhtälöitä ja ovat huomattavasti helpompia ratkaista kuin alkuperäiset differentiaaliyhtälöt. Ensin on valittava tuntemattomia kertoimia sisältävä funktio, jota käytetään approksimoimaan ratkaisua. Tämän jälkeen kertoimet ratkaistaan siten, että funktio kuvaa todellista ratkaisua. Usein funktioina käytetään polynomi-funktioita niiden helpon matemaattisen käsittelyn vuoksi. Elementtiyhtälöt esitetään usein matriisimuodossa, joka ajasta riippuvassa lämmönjohtumisongelmassa voisi näyttää seuraavalta

$$[M]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F\}$$

Missä $[k]$ on jäykkyyismatriisi, $\{u\}$ on pystyvektori, joka sisältää solmupisteiden tuntemattomat muuttujat ja $\{F\}$ on pystyvektori, joka kuvaa solmuihin kohdistuvia ulkoisia voimia tai muita ulkoisia vaikutuksia. (Chapra & Canale 1998, Burnett 1987) $[M]$ on massamatriisi ja $\{\dot{u}\}$ tuntemattomien muuttujien aikaderivaatat sisältävä vektori. Muuttujien aikaderivaattoja on approksimoitava jollain menetelmällä, esimerkiksi ilmaise-malla se hetkillä t ja $t + 1$ vastaavilla u :n arvoilla. Näin saadaan aikaan matriisiyhtälö, josta voidaan aina ratkaista seuraavan askeleen u .

Koko systeemiä koskeva ratkaisu saadaan kokoamalla yhteen yksittäisten elementtien elementtiyhtälöiden ratkaisut siten, että ratkaisun jatkuvuus varmistetaan elementtien rajapinnoilla. Tämä tapahtuu varmistumalla, että tuntemattomat tekijät elementtien yhteisissä solmupisteissä saavat saman arvon. Elementtiyhtälöt kootaan koko systeemin toimintaa kuvaaviksi systeemi yhtälöiksi matriisimuotoon ja otetaan huomioon systeemin reunaehdot. Tämän jälkeen systeemi yhtälöt ratkaistaan sopivalla lineaarialgebrallisella menetelmällä. (Chapra & Canale 1998, Burnett 1987)

4.1.1 WUFI Pro 5.2

WUFI (saks. *Wärme und Feuchte Instationär*) on Fraunhofer Institut for Building Physics -insituutin kehittämä ohjelmaperhe rakenteiden kosteus- ja lämpötekniseen analysointiin. WUFI:lla voidaan suorittaa ajasta riippuvia simulointeja yhdistetystä lämmön ja kosteuden siirrosta käyttäen realistista säädataa sisältäen sateen ja säteilyn vaikutukset. Tässä

työssä käytettävä WUFI Pro 5.2 on yksiulotteiseen mallintamiseen kykenevä ohjelma. (Frauenhofer IBP 2018)

Koska WUFI on erityisesti rakennusfysikaalisiin lämpö- ja kosteustarkasteluihin kehitetty validoitu ohjelmisto, käytettiin sitä laskelmien alkuvaiheessa tehtyihin vertailumallinnuksiin, jotta voitiin varmentaa käyttötarkoitukseen soveltuvuus myös COMSOL-malleille sekä varmistua kosteudensiirron huomioon ottamisen tarpeesta laskelmissa. Jokainen seinärakenne mallinnettiin 1D-mallina WUFI Pro 5.2-laskentaohjelmalla Vantaan 2007 ilmastossa siten, että seinä on suunnattu etelään eli ilmansuuntaan, josta suurin osa viistosateesta tulee. Malli laskettiin sekä kosteudensiirto huomioon ottaen että ilman kosteudensiirtoa. Saatuja lämpövirran tiheyksiä rakenteen sisäpinnalla verrattiin toisiinsa tavoitteena selvittää, onko kosteudensiirrolla merkittävää vaikutusta laskettuun lämpövirran tiheyden arvoon ja onko kosteudensiirto siten sisällytettävä lopullisiin laskentamalleihin. Johtopäätökset tästä tarkastelusta on raportoitu luvussa 5.2.

Tämän jälkeen tehtiin samoista seinärakenteista COMSOL-laskelmat sekä ottaen huomioon kosteudensiirto että ilman kosteudensiirtoa ja verrattiin eri ohjelmien laskemia lämpövirran tiheyksiä rakenteen sisäpinnalla toisiinsa. Pitkäaaltoista säteilyä ei otettu huomioon näissä vertailumallinnuksissa, sillä pitkäaaltoisen säteilyn sisällyttäminen laskelmiin eri ohjelmissa (COMSOL ja WUFI) täysin samalla tavalla olisi ollut vaikeaa, joten pitkäaaltoisen säteilyn sisällyttäminen vertailumallinnuksiin olisi vaikeuttanut laskentatulosten vertailua. Lopullisissa COMSOL-laskelmissa pitkäaaltoinen säteily oli otettu huomioon. COMSOL:in ja WUFI:n laskentamenetelmissä on muitakin eroja, joten täysin samanlaisia tuloksia niillä ei oletettu saatavan. COMSOL-mallien toiminnan varmentamiseksi tehtyjä laskelmia ei ole raportoitu tässä työssä.

4.1.2 COMSOL Multiphysics 5.3a

COMSOL Multiphysics on nimensä mukaisesti monenlaisiin fysikaalisiin tarkasteluihin pystyvä mallinnus- ja laskentaohjelma, jolla on mahdollista ratkaista stationäärisiä tai ajasta riippuvia fysikaalisia ongelmia tai erilaisia signaalinkäsittelyn ongelmia. Ohjelmalla on mahdollista mallintaa mitä tahansa fysikaalisia ilmiöitä, joita voidaan kuvata osittaisdifferentiaaliyhtälöillä. COMSOL hyödyntää yleensä FEM:iä tai BEM:iä (eng. *Boundary Element Method*) osittaisdifferentiaaliyhtälöiden diskretisoimiseksi ja ratkaisee ne erilaisilla numeerisilla menetelmillä. Ohjelmaan on sisäänrakennettuna monia erilaisia valmiita fysiikkamoduuleja ja ohjelma osaa myös ehdottaa näihin liittyen erilaisia sopivia tutkimuksia (eng. *study*) ja ratkaisijoita (eng. *solver*), mutta valinnan voi tehdä vapaasti myös itse. Ohjelmaan on myös mahdollista kirjoittaa omia yhtälöitä ja luoda näiden avulla uusia fysiikkamoduuleja. (COMSOL 2018)

Tässä työssä COMSOL Multiphysics-ohjelmalla tehtiin yksiulotteisia ajasta riippuvia lämpö- ja kosteudensiirtomallinnuksia erilaisille seinärakenteille. Tähän käytettiin ohjelman “heat and moisture transfer in building materials” –solmua. Tässä työssä hyödynnettiin COMSOL:in LiveLink for MATLAB toimintoa. Tämän avulla COMSOL voidaan yhdistää MATLAB:iin, mikä mahdollistaa MATLAB:in funktioiden ja skriptien käyttämisen COMSOL-malleissa. MATLAB on MathWorksin omistama matematiikkaohjelma ja ohjelmointikieli. LiveLink for MATLAB sisältää ohjelmointirajapinnan, joka käyttää Javaan perustuvaa yksinkertaistettua syntaksia. Rajapinnan avulla COMSOL-malleja voidaan luoda, muokata ja suorittaa MATLAB:in käyttöliittymän avulla sekä käsitellä tuloksia. (COMSOL 2017a) Koska tässä työssä oli tarpeen tehdä suuri määrä yksinkertaisia mallinnuksia, manuaalisen työn vähentämiseksi oli tarpeen luoda koodi, jolla voitiin muokata COMSOL-mallia. Ohjelmoinnin avulla voitiin suorittaa mallin laskenta useilla eri asetuksilla toistorakenteiden avulla automatisoidusti esimerkiksi eri ilmasto-datalla, tallentaa halutut tulokset sekä käsitellä niitä halutulla tavalla.

Jokainen seinärakenne mallinnettiin COMSOL Multiphysics –ohjelmalla yksiulotteisena mallina. Mallit luotiin aluksi COMSOL:in graafisen käyttöliittymän avulla ja reunaehdoja vaihdeltiin automatisoidusti LiveLink for MATLAB:in avulla. Mallinnuksissa huomioon otetut lämmönsiirtomuodot ovat johtuminen, lyhytaaltainen säteily auringosta sekä pitkäaaltoinen säteily taivaan ja seinän sekä maan ja seinän välillä. Tuuletusraoissa rakenteissa tuuletusraossa virtaavalle ilmalle on annettu ilmanvaihtokerroin, mutta konvektiota ei ole mallinnettu tämän tarkemmin. Ilmaväleissä tapahtuvaa lämpösäteilyä ei ole mallinnettu erikseen laskennan yksinkertaistamiseksi vaan ilmaväleille on käytetty valmiita lämmönjohtavuuden arvoja WUFI:n materiaalitietokannasta, joissa on otettu huomioon lämpösäteilyn vaikutukset. Lisäksi on otettu huomioon vesihöyryn tiivistymisessä vapautuva tai höyrystymisessä sitoutuva latentti lämpö. Vesihöyryn diffuusio ja nestemäisen veden kapillaarinen siirtyminen on otettu huomioon kaikilla rakenteilla. Mallinnukset tehtiin jokaiseen pää- ja väli-ilmansuuntaan käyttäen luvussa 4.2.1 ja liitteessä 4 esiteltäviä rakennusfysikaalisia testivuotia.

Mallinnukset tehtiin 1 h aika-askelilla käyttäen laskenta-aikana 2 vuotta. Mallinnusten tulodatasta tarkasteltiin mallinnusten jälkimmäistä vuotta, jolloin alkuolosuhteiden vaikutukset saatiin minimoitua. Mallinnusten tuloksena saatiin lämpövirran tiheyden arvot rakenteen sisäpinnalla ja rakenteen ulkopinnan lämpötilat tunnin välein. Lisäksi jokaiselle tutkittavalle rakenteelle laskettiin stationääritilassa ns. kuiva U-arvo vertailuluvuksi, johon eri ajanhetkillä laskettuja arvoja verrattiin. Kuivaa U-arvoa, jossa ei ole kosteuden vaikutusta mukana, käytettiin, sillä materiaalien tyypillisen, keskimääräistä tilannetta edustavan, kostean lämmönjohtavuuden määrittäminen on vaikeaa. On otettava huomioon se, ettei Arcadassa kehitetty nopea U-arvon mittalaite ota huomioon rakenteessa olevia kylmäsiltoja vaan laite asennetaan lämpökuvauksen avulla homogeeniseen kohtaan rakennetta. Tästä syystä U-arvon vertailuarvo oli myös laskettava ilman mahdollisten kylmäsiltojen vaikutusta.

4.2 Laskentatarkastelujen lähtötiedot

4.2.1 Ulkoilman olosuhteet

Ilmatieteen laitos ja TTY ovat kehittäneet FRAME-projektin yhteydessä kaksi kondenssin ja homeen kasvun kannalta kriittistä rakennusfysikaalista testivuotta, jotka ovat todellisia toteutuneita ulkoilman olosuhteita Jokioisista 2004 ja Vantaalta 2007. Näistä on tehty myös modifioimalla ennusteet vuosien 2050 ja 2100 ilmastolle hyödyntäen ilmastomuutosta kuvaavia ennustemalleja. Testivuodet käsittävät säädatan tunneittain vuoden ajalta sisältäen kaikki oleelliset ulkoilman olosuhdetekijät, lukuun ottamatta taivaalta tulevaa pitkäaaltoista säteilyä. Pitkäaaltoisella säteilyllä on yleensä kuitenkin merkittävä vaikutus rakenteen toimintaan ja se on otettava huomioon laskennassa, mikäli mahdollista.

Tarkemmat ohjeet testivuosien käyttöön rajoituksineen löytyvät esimerkiksi RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 –kirjan luvusta 2 tai FRAME-projektin loppuraportista. (Vinha 2014, Vinha, Laukkarinen *et al.* 2013) Rakennusfysikaalisia testivuosia käytettiin tässä työssä, sillä ne ovat todellisia toteutuneita vuosia ja sisältävät lähes kaikki tarvittavat säätiedot tämän työn mallinnuksia varten. Ulkolämpötilan sekä materiaalien lämpötilan alkuarvona käytettiin laskennassa 20 °C ja suhteellisen kosteuden alkuarvona 80 % RH.

Tässä työssä taivaan pitkäaaltoinen säteily otettiin huomioon laskemalla pitkäaaltoisen säteilyn taseet taivaan tehollisen lämpötilan avulla, sillä rakennusfysikaaliset testivuodet eivät sisällä pitkäaaltoisen säteilyn mittausdataa. Tämän työn laskentamalleissa ei otettu huomioon maanpinnasta heijastunutta pitkäaaltoista säteilyä, mutta maanpinnan emittoima lämpösäteily otettiin huomioon olettamalla maanpinnan lämpötila samaksi kuin ulkoilman lämpötila. COMSOL:iin syötettiin alla olevat pitkäaaltoisen säteilytaseen kaavat seinän ja taivaan sekä seinän ja maan pinnan välillä. Jokela (2018) vertaili työssään erilaisia pitkäaaltoisen säteilyn laskentamalleja. Tässä diplomityössä käytetty taivaan tehollinen lämpötila T_{sky} laskettiin Jokelan diplomityössä käyttämän taivaan säteilymallin mukaisilla kaavoilla (Jokela 2018).

Kaavat 4.1 ja 4.2 ovat peräisin Delphin 5.8.1 -ohjelman ohjeesta (Nicolai & Grünwald 2006) ja ne ottavat huomioon seinäpinnan, taivaan ja maan pinnan emissiviteetit sekä seinän ja maan pinnan välisen kulman. Kaavat voitaisiin johtaa helposti myös luvun 2.4 kaavoista 2.38 ja 2.43 sekä geometriasta.

$$q_{grd,\beta} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{grd}} + \frac{1}{\varepsilon_{bld}} - 1} \cdot \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sigma(T_{grd}^4 - T_{bld}^4) \quad (4.1)$$

missä $q_{grd,\beta}$ on seinäpinnan ja maanpinnan välinen säteilytase [W/m^2], ε_{grd} on maan pinnan emissiviteetti [-], ε_{bld} on seinän ulkopinnan emissiviteetti [-], β on seinän ja maanpinnan

välinen kulma $[\circ]$, T_{grd} on maanpinnan lämpötila [K], jota approksimoidaan ulkoilman lämpötilalla T_e [K] ja T_{bld} on seinän ulkopinnan lämpötila [K].

$$q_{sky,\beta} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{sky}} + \frac{1}{\varepsilon_{bld}} - 1} \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sigma(T_{sky}^4 - T_{bld}^4) \quad (4.2)$$

missä $q_{sky,\beta}$ on seinäpinnan ja taivaan välinen säteilytase [W/m^2], ε_{sky} on taivaan emissiviteetti, jolle käytetään arvoa 1, [-], ε_{bld} on seinän ulkopinnan emissiviteetti [-], β on seinän ja maanpinnan välinen kulma $[\circ]$, T_{sky} on taivaan tehollinen lämpötila, jossa on otettu huomioon pilvisyyden vaikutus [K] ja T_{bld} on seinän ulkopinnan lämpötila [K].

Auringon säteilyn intensiteetti tunnin välein kummankin testivuoden säätiedoilla laskettiin eri pää- ja väli-ilmansuuntiin osoittaville pystysuorille seinärakenteille käyttäen vaakasuoralle pinnalle tunnin välein mitattua säteilyn intensiteetin arvoa (rakennusfysikaaliset testivuodet Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007). Koska eri suuntaisille seinäpinnoille kohdistuvan auringon säteilyn intensiteetin laskenta vuoden eri tunteina on melko monimutkaista, seinäpinnoille kohdistuvat säteilyintensiteetit laskettiin käyttäen WUFI Pro 5.2 -ohjelmaa, johon luotiin mielivaltainen seinärakenne, jonka suuntausta vaihdeltiin eri ilmansuuntiin. Ohjelmasta tulostettiin säteilyn intensiteettiarvot jokaiselle ilmansuunnalle tekstitiedostoina, joita käytettiin reunaehtoina COMSOL-malleissa.

Rakennusfysikaaliset testivuodet sisältävät tuntikohtaiset sademäärät vaakapinnalle sekä tuulennopeudet ja -suunnat. Sademääriä modifioitiin siten, että jos kuluvan ja kahden edellisen tunnin lämpötilojen keskiarvo on pakkasen puolella, sademäärä muutetaan nol-laksi. Tämä tehdään sen vuoksi, että lumisateen ei oleteta merkittävässä määrin imeytyvän seinään. Sademäärän sekä tuulensuunnan ja -nopeuden avulla laskettiin seinään kohdistuva viistosaderasitus standardin SFS-EN ISO 15927-3:2009 mukaisesti. Laskennassa käytettyjä parametrejä ja muuttujia on esitetty taulukossa 4.1. Laskenta tehtiin käyttäen maastoluokan II arvoja. Tarkastelukorkeudeksi valittiin 5,0 m ja lisäksi oletettiin maaston olevan tasainen ja esteetön rakennuksen lähellä (120 m läheisyydessä). Rakennuksessa oletettiin olevan loiva harjakatto ja rakennuksen korkeuden olevan korkeintaan kaksi kerrosta. Tuntikohtainen viistosade R_{wdr} [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] lasketaan kaavalla 4.3. (SFS-EN ISO 15927-3:2009)

$$R_{wdr} = C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \cdot \frac{2}{9} \cdot U_{10} \cdot R_h^{\frac{8}{9}} \cdot \cos(\theta) \quad (4.3)$$

missä C_R on maaston rosoisuuskerroin [-], C_T on pinnanmuodostuskerroin [-], O on este-tekijä [-], W on seinäkerroin, joka riippuu rakennuksen muodosta ja korkeudesta [-], U_{10} on tuulennopeus 10 m korkeudella maanpinnasta [m/s], R_h on vaakapinnalle tuleva sade-määrä [mm/h] ja θ on seinän normaalin ja tuulensuunnan välinen kulma $[\circ]$. Kaava ottaa huomioon tuulennopeuden ja suunnan vaikutuksen viistosateen määrään. Kaavan mukaan

viistosadetta tulee seinälle, jos tuulennopeus on suurempi kuin 0 m/s, sademäärä on suurempi kuin 0 mm/h ja seinän normaalin ja tuulensuunnan välinen kulma on alle 90°. Viimeinen ehto on varmistettava lisäämällä laskelmiin ehto:

$$\cos(\theta) = \begin{cases} \cos(\theta), & \text{jos } \cos(\theta) \geq 0 \\ 0, & \text{jos } \cos(\theta) < 0 \end{cases}$$

Taulukko 4.1 Viistosateen laskennassa käytetyt parametrit ja muuttujat.

C_R [-]	C_T [-]	O [-]	W [-]	U_{10} [m/s]	R_h [mm/h]	θ [°]
0,875	1,0	1,0	0,4	säädatasta	säädatasta	Lasketaan säädatasta

Työssä käytetty säädata on esitetty liitteessä 4. Testivuosisien säädata on saatavilla ilmaiseksi Ilmatieteen laitoksen sivuilta. Testivuodet eroavat toisistaan pääasiassa viistosateen suunnassa ja määrässä. Jokioisten testivuosi (2004) on myös hieman kylmempi ja ilman suhteellinen kosteus on keskimäärin korkeampi. Vantaan testivuosi (2007) taas on sateisempi. Jokioisissa 2004 viistosade tulee pääasiassa lounaasta, Vantaalla 2007 suoraan etelästä.

COMSOL-malleihin jouduttiin lisäämään sadeveden imeytymistä rajoittava sigmoidifunktio, sillä muuten rankan sateen aikana kosteuspitoisuudet joidenkin seinärakenteiden ulko-osissa nousivat suuremmiksi kuin materiaalin maksimikosteuspitoisuus w_{max} , mikä on fysikaalisesti mahdotonta. Rajoitusfunktio aikaansaa sadeveden absorptiokertoimen arvon laskemisen nollaan, kun uloimman rakennekerroksen maksimikosteuspitoisuus saavutetaan eli sadeveden imeytyminen seinään lakkaa. Funktio saa arvon 1, kun materiaalin kosteuspitoisuus on alle w_{max} ja kosteuspitoisuuden lähestyessä maksimikosteuspitoisuutta, funktion arvo laskee nopeasti nollaan. Funktio on esitettynä alla:

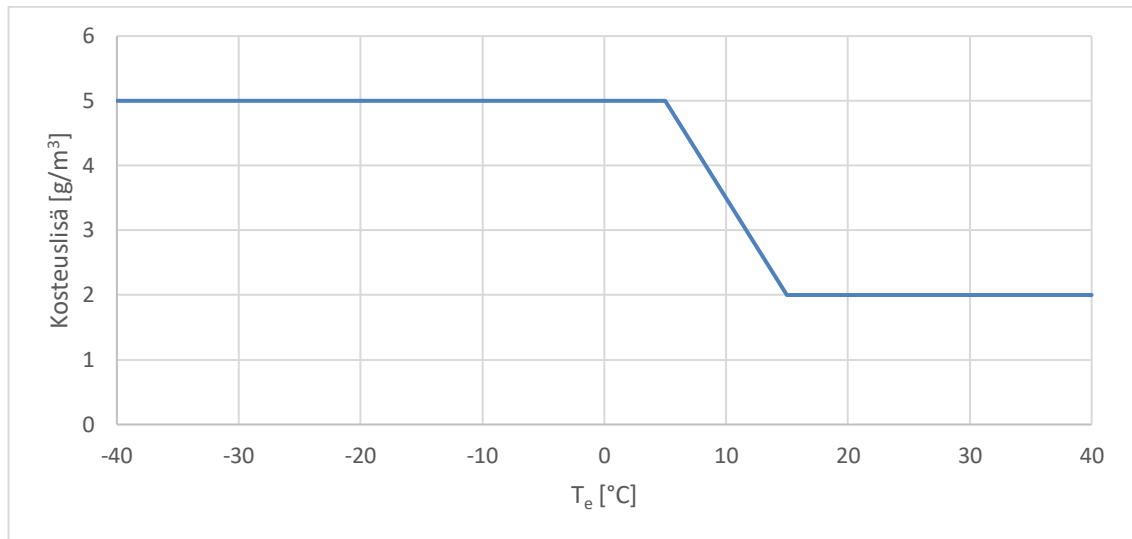
$$\alpha_{rain.factor}(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (4.4)$$

missä x on kosteuspitoisuuden vaihteluväli [kg/m^3], kerroin $a = -1$ ja c on materiaalin maksimikosteuspitoisuus w_{max} .

4.2.2 Sisäilman olosuhteet

Sisäilman oletettiin olevan vakioilämpötilassa 21°C. Sisäilman kosteuslisän määrittämiseksi on olemassa luokitus standardissa SFS-EN ISO 13788:2012. Tässä työssä sisäilman kosteuslisänä käytettiin kuitenkin RIL 107-2012 kosteusluokan 2 mukaisia kosteuslisän mitoitusarvoja, kuten suositellaan tehtävän Suomen olosuhteissa (RIL 107-2012). Kosteusluokka 2 kuvaa tilannetta tavanomaisissa rakennuksissa, joissa ei ole erityisiä kosteuslähteitä.

Sisäilman kosteuslisän arvo riippuu ulkolämpötilasta T_e kuvan 4.1 mukaisesti.



Kuva 4.1 Sisäilman kosteuslisä (mukaillen RIL 107-2012).

Johtuen WUFI:n tavasta laskea sisäilman kosteuslisä ulkoilman lämpötilan liukuvasta keskiarvosta kuukauden ajalta, tuotiin WUFI:n sisäilman kosteuslisästä laskemat sisäilman kosteusolosuhteet lähtötiedoiksi COMSOL:iin tulosten vertailun helpottamiseksi.

4.2.3 Materiaaliominaisuudet

Rakennusfysikaalisen mallintamisen kannalta keskeiset materiaaliominaisuudet ovat materiaalien lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, ilmanläpäisevyys, vesihöyrynläpäisevyys, kosteudenläpäisevyys tai kosteusdiffusiviteetti, tasapainokosteus, pinnan emissiviteetti sekä pitkä- ja lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimet. Mallintamisessa tulisi käyttää mahdollisimman paikallisesti määritettyjä materiaaliominaisuuksia eli Suomea koskeissa mallinuksissa tulisi käyttää Suomessa tyypillisten tuotteiden materiaaliominaisuuksia. Mikäli mallinuksissa tarkkaillaan lämmön lisäksi kosteudensiirtoa, tulisi materiaaliominaisuuksille käyttää lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan muuttuvia arvoja. (Vinha et al. 2013)

Materiaaliominaisuudet mallinnusta varten otettiin mahdollisuuksien mukaan TTY:llä toteutetun FRAME-projektin loppuraportista. Muita lähteitä ovat olleet WUFI:n materiaalikirjasto, RIL 255-1-2014 ja standardi SFS-EN ISO 10456:2008. Kaikille huokoisille materiaaleille käytettiin kosteuspitaisuudesta riippuvaa lämmönjohtavuutta sekä kosteusdiffusiviteetin arvoa. Lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuuden vaikutus rakenteen sisäpinnan lämpövirran tiheyteen havaittiin erittäin pieneksi alustavissa tarkasteluissa (ks. luku 5.3). Ilmakerrokset mallinnettiin WUFI:n materiaalikirjaston valmiilla ilmaväleille annetuilla materiaaliominaisuuksilla ("air layer XX mm without additional moisture ca-

capacity”). Liitteissä 2 ja 3 olevissa taulukoissa on esitetty laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet. Alkuolosuhteina materiaaleissa käytettiin suhteellisen kosteuden 80 % RH mukaisia kosteuspitoisuuksia, kun lämpötila on 20 °C.

4.2.4 Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus

Tässä työssä tarkasteltavista rakenteista on tuuletusraollisia 2 kpl eli rakenteet W2 ja W4. Jokela (2018) selvitti diplomityössään puuverhotun seinän tuuletusvälin ilmanvaihtoker-toimen määrittämiseen käytettäviä kaavoja ja vertaili näiden tuloksia kirjallisuudesta löy-tyviin arvoihin. Tässä työssä rakenteelle W2 käytettiin pyöristettynä Jokelan laskemia vuosikeskiarvoja Jokioisten 2004 testivuodella 3,0 m korkealle puuverhoillulle ulkosei-nälle, jonka tuuletusvälin paksuus on 25 mm. Tuuletusvälin yläpäässä on ilmapirtaa ra-joittava pelti. Jokela laski työssään ilmanvaihtuvuuden arvot pohjois- ja eteläseinille, tässä työssä näiden välisten ilmansuuntien arvot on interpoloitu lineaarisesti. Käytetyt il-manvaihtuvuudet on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2 Rakenteelle W2 käytetyt ilmanvaihtuvuudet ilmansuunnittain (mukail-len Jokela 2018).

Ilmansuunta	Pohj.	Koill.	Itä	Kaak.	Etelä	Loun.	Länsi	Luode
Ilmanvaihtuvuus n [1/h]	250	262,5	275	287,5	300	287,5	275	262,5

Tiili-villa-tiiliseinän (W4) ilmanvaihtuvuuksina käytettiin Mäkitalon (2012) diplomityös-sään käyttämiä ilmanvaihtuvuuden arvoja. Pohjoisen ja etelän puoleisten julkisivujen vä-liarvot on interpoloitu lineaarisesti. Tässä työssä käytetyt arvot on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3 Rakenteelle W4 käytetyt ilmanvaihtuvuudet ilmansuunnittain (mukail-len Mäkitalo 2012).

Ilmansuunta	Pohj.	Koill.	Itä	Kaak.	Etelä	Loun.	Länsi	Luode
Ilmanvaihtuvuus n [1/h]	5	6,25	7,5	8,75	10	8,75	7,5	6,25

4.3 Mallinnettavat rakenteet

Tässä työssä tarkasteltiin kuutta erilaista seinärakennetta, jotka valittiin projektin ensim-mäisessä konsortiokokouksessa tutkimuksen kannalta sopiviksi ja tyypillisiksi raken-teiksi, jotka edustavat sekä Suomen että Saksan rakennuskantaa. Alla olevassa taulukossa 4.4 on koottu yhteenvedona kaikki mallinnetut rakenteet ja niiden U-arvot. Rakenteita

tutkittiin yksiulotteisilla laskentamalleilla, joissa ei voida ottaa huomioon kylmäsiltoja, joten taulukon U-arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia esimerkiksi kylmäsiltojen osalta korjattujen U-arvojen kanssa, joita tyypillisesti käytetään energiankulutuslaskelmissa.

Taulukko 4.4 Yhteenveto mallinnetuista rakenteista.

Tunnus	Rakenteen kuvaus	U-arvo [W/m ² K]
W1	Massiivitiiliseinä	1,3
W2	Puurankaseinä	0,22
W3	Betonisandwich-seinä	0,36
W4	Tiili-villa-tiiliseinä	0,28
W5	Eristämätön kuorimuuriseinä	1,3
W6	Massiivitiiliseinä reikätiilistä	1,0

Eri rakennetyyppien rakenneleikkaukset on esitetty liitteessä 1 ja mallintamiseen käytetyt materiaaliominaisuudet liitteissä 2 ja 3.

5. TULOKSET JA POHDINTA

Laskentamalleista tulostettiin lämpövirran tiheys rakenteen sisäpinnalla ja rakenteen ulkopinnan lämpötila ajan funktiona tunnin välein jälkimmäisenä laskentavuotena. Lämpövirran tiheydestä ja rakenteen yli vallitsevasta lämpötilaerosta laskettiin näennäiset U-arvot käyttäen kaavaa 3.2. Liitteessä 5 esitetään jokaiselle seinärakenteelle lasketut näennäiset U-arvot kuvaajina ajan funktiona Jokioisten 2004 ja Vantaan 2007 testivuosien säädatoilla pohjoisseinällä. Kuvaajissa on esitetty myös U-arvon vertailuarvo laskettuna kaavoilla 3.7-3.9. Työhön on liitetty ainoastaan osa kuvaajista niiden suuren määrän takia. Johtopäätösten kannalta tärkeimmät tuloksia esittävät kuvaajat ja taulukot esitetään tässä luvussa. Liitteen 6 kuvaajissa esitetään kosteudensiirron vaikutusta rakenteiden sisäpinnan lämpövirran tiheyteen eri rakenteilla.

5.1 WUFI:n ja COMSOL:in välillä havaitut erot

Työn tarkoituksena ei ollut vertailla eri laskentaohjelmien toimintaa, vaan syy WUFI:n käytölle COMSOL:in lisäksi oli varmistua COMSOL-mallien soveltuvuudesta tämän työn tarkasteluihin. Kirjallisuudessa ainakin Knarud & Geving (2017) raportoivat eroista WUFI:n ja COMSOL:in laskentatuloksissa analysoitaessa tiiliseinän kosteus- ja lämpötekniistä käyttäytymistä. He päättelivät erojen liittyvän auringon säteilyn ja viistosateen mallintamiseen. Ohjelmien välisiä eroja rakennusfysiikan sovelluksissa voisi olla tarpeen selvittää lisää.

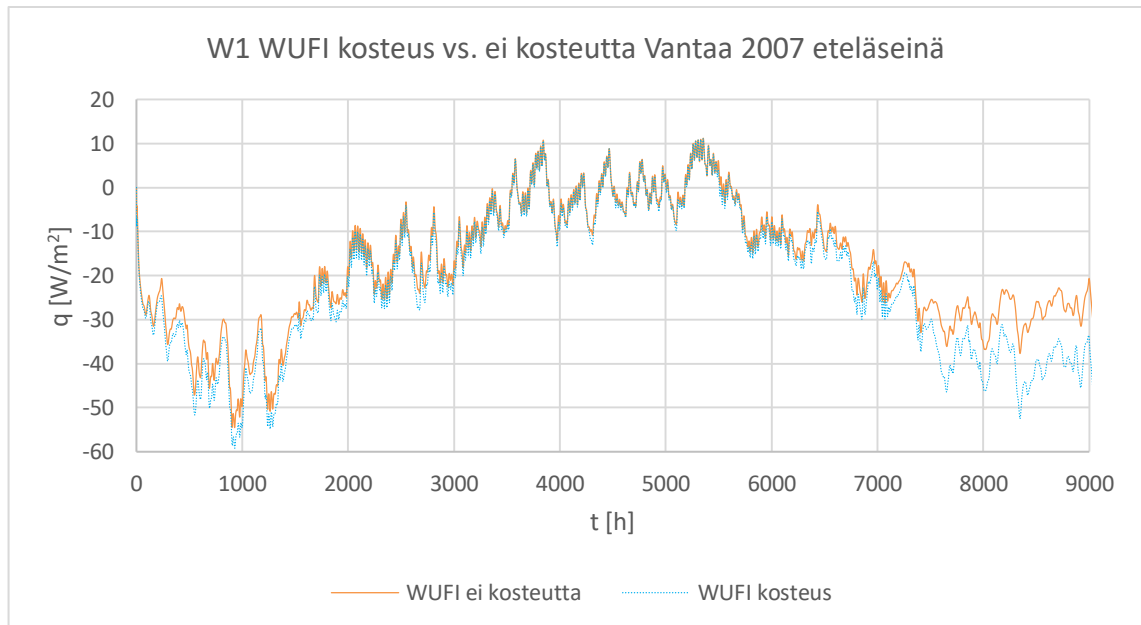
Mallinnuksissa saaduissa lämpövirran tiheyden arvoissa havaittiin selkeitä eroja WUFI:n ja COMSOL:in välillä, silloin kun kosteudensiirto oli mukana mallinnuksissa ja tarkasteltiin massiivitiiliseinää (W1 ja W6, ks. liite 1), jolle kohdistui runsaasti viistosadetta. Vertailumallinnuksissa käytettiin myös COMSOL:issa seinälle kohdistuvana viistosademääränä WUFI:sta tulostettuja tunneittaisia arvoja vertailun helpottamiseksi. Pelkkää lämmönsiirtoa mallinnettaessa lämpövirran tiheys on hyvin samansuuruinen kummallakin ohjelmalla laskettuna. Samoin, jos tarkastellaan sellaista seinää, jolle ei kohdistu paljoa viistosadetta.

Johtuen ohjelmien perustavanlaatuisesti poikkeavista tavoista ratkaista osittaisdifferentiaali-reuna-arvo-ongelmia (elementtimenetelmä vs. volyymimenetelmä) täysin vertailukelpoinen sadeveden imeytymisen implementaatio todettiin haastavaksi ja ainoastaan w_{max} :in ylittämisen estävä rajoitin oli COMSOL-malleissa mukana. WUFI:n dokumentaation puutteellisuus viistosateen imeytymisen suhteen oli osasyynä sille, että täysin vertailukelpoisia tuloksia oli haastavaa saada. Selvää kuitenkin on, että viistosateella on merkittävä vaikutus tiilirakenteiden sisäpinnan läpäisevän lämpövirran tiheyteen laskettuna kummalla tahansa ohjelmalla ja kummalla tahansa tässä työssä käytetyllä säädätällä.

5.2 Kosteudensiirron vaikutus seinärakenteiden käyttäytymiseen

Tässä alaluvussa esitellään kosteuden vaikutuksia rakenteiden lämpötekniiseen käyttäytymiseen. Vaikutusten havaitsemiseksi valittiin ilmasto ja seinän suuntaus, jossa viistosaderasitus on suurimmillaan eli eteläseinä Vantaan 2007 ilmastossa. Pitkäaaltoista säteilyä ei ole otettu huomioon tämän alaluvun tarkasteluissa. Samanlainen tarkastelu tehtiin kaikille tässä työssä mallinnettaville rakenteille. Tässä luvussa esitettyjen tarkastelujen perusteella päädyttiin siihen, että kosteudensiirto oli otettava huomioon tämän työn laskentatarkasteluissa. Projektin alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan ajasta riippuvat laskennalliset tarkastelut, joiden avulla eri ajan hetkien mitattavuuksia voitiin arvioida, oli tarkoitus tehdä kytkemättä tarkasteluihin mukaan kosteuden vaikutusta lämmön siirtymiseen. Työn alussa kuitenkin havaittiin, että kosteuden vaikutus lämmön siirtymiseen lähes kaikissa tarkasteltavissa rakenteissa on johtopäätösten kannalta selvästi merkittävä, ja kaikki tarkastelut päätettiin siksi tehdä ottaen huomioon lämmön ja kosteuden siirtymisen yhdistetty vaikutus.

Tarkastellaan esimerkinomaisesti seinärakennetta W1 eli massiivitiiliseinää. Muista rakenteista on esitetty vastaavat kuvaajat liitteessä 6. Alla on esitetty kosteudensiirron vaikutus rakenteen sisäpinnalta laskettuun lämpövirran tiheyteen massiivitiiliseinässä jälkimmäisenä mallinnusvuotena. Kuvaan 5.1 on piirretty WUFI:lla laskettu lämpövirran tiheys rakenteen sisäpinnalla, kun kosteus on otettu huomioon laskennassa (sininen viiva) ja kun kosteutta ei ole otettu huomioon (oranssi viiva).



Kuva 5.1

Kosteudensiirron vaikutus massiivitiiliseinän W1 sisäpinnan lämpövirran tiheyteen.

Kuvasta 5.1 nähdään, että suuri kosteusrasitus lisää merkittävästi rakenteen W1 sisäpinnan lämpövirran tiheyttä talviaikana. Miinusmerkki kuvaa lämpövirran suuntaa sisältä rakenteeseen päin. Loppu- ja alkuvuodesta on havaittavissa merkittävä ero lämpövirrassa, mikäli kosteudensiirto otetaan huomioon laskelmissa. Tällainen tulos oli odotettavissa, sillä tiilimuuraus ilman rappausta absorboi voimakkaasti sadevettä, eikä rakenteessa myöskään ole höyrynsulkua tai muita tiiviitä vesihöyryn siirtymistä vastustavia kerroksia. Tästä johtuen tiilen kosteuspitoisuus nousee ilmankosteuden ja viistosateen vaikutuksesta helposti. Kosteus lisää huomattavasti rakenteen lämmönjohtavuutta, sillä seinärakenne koostuu ainoastaan yhdestä vettä imevästä ja huokoisesta materiaalista. Rakenteen sisällä olevan nestemäisen veden höyrystyminen kuivumisajanhetkinä vaatii myös latenttia faasimuutosenergiaa, jolla on myös lämpövirran tiheyksiä kasvattava vaikutus.

5.3 Lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuuden vaikutusten tarkastelut

Kuten aiemmin on todettu, materiaalien lämmönjohtavuus riippuu sekä lämpötilasta että kosteuspitoisuudesta. Lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuuden vaikutuksen arvioimiseksi suoritettiin vertailutarkastelu, jonka avulla varmistettiin, onko lämpötilariippuvuuden ottaminen huomioon varsinaisissa mallinnuksissa perusteltua. WUFI:n manuaalista löydetään kaavat lämmönjohtavuuden kosteuspitoisuus- ja lämpötilariippuvuuksille. Nämä yhdistämällä saadaan alla oleva kaava, joka kuvaa materiaalin lämmönjohtavuuden riippuvuutta lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta.

$$\lambda(w, T) = (\lambda_0 + \lambda_0 * a * (T - 283,15K)) * (1 + b * \frac{w}{\rho_{dry}}) \quad (5.1)$$

Missä λ_0 [W/m·K] on kuivan materiaalin lämmönjohtavuus, kun $T = 10$ °C, a [W/(m²·K)], on lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuutta kuvaava kerroin, T [K] on lämpötila, b [%/m-%] on lämmönjohtavuuden kosteusriippuvuutta kuvaava kerroin, w [kg/m³] on materiaalin kosteuspitoisuus ja ρ_{dry} [kg/m³] on materiaalin kuivatiheys.

Vertailutarkastelu tehtiin antamalla a :lle arvo 0,0002 W/(m²·K) ja b :lle arvo 0,08 (arvot WUFI:n manuaalista) ja syöttämällä kaava 5.1 COMSOL:iin lämmönjohtavuudeksi seinärakenteen W1 malliin sekä suorittamalla laskenta Vantaan 2007 testivuodella eteläseinalle yhden vuoden laskenta-ajalla. Tämän jälkeen vastaava laskenta suoritettiin muuttamalla a :n arvoksi $a = 0$ W/(m²·K) eli poistamalla lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuus. Näiden kahden laskelman tuloksena saatuja lämpövirran tiheyden arvoja rakenteen sisäpinnalla verrattiin toisiinsa ja todettiin, että suurin absoluuttinen ero lämpövirran tiheydessä oli 0,39 W/m², mikä on prosentteina noin 1,5 % sen hetkisestä lämpövirran tiheyden arvosta. Suurimman osan vuodesta ero oli vielä selkeästi pienempi, yleensä alle 0,5 %. Kesällä lämpövirran tiheyden ollessa lähes nolla, voi ero olla suhteellisesti suurempi, vaikka absoluuttinen ero olisi edelleen hyvin pieni. Koska lämmönjohtavuuden

lämpötilariippuvuutta kuvaavan kertoimen a arvo on huonosti tunnettu likiarvo ja lisäksi lämpötilariippuvuuden vaikutus lämpövirtaan on erittäin pieni tutkittavissa tapauksissa, päätettiin lämpötilariippuvuus jättää huomiotta tämän työn laskentatarkasteluissa.

5.4 Eri osatekijöiden vaikutukset U-arvon mitattavuuteen seinärakenteittain

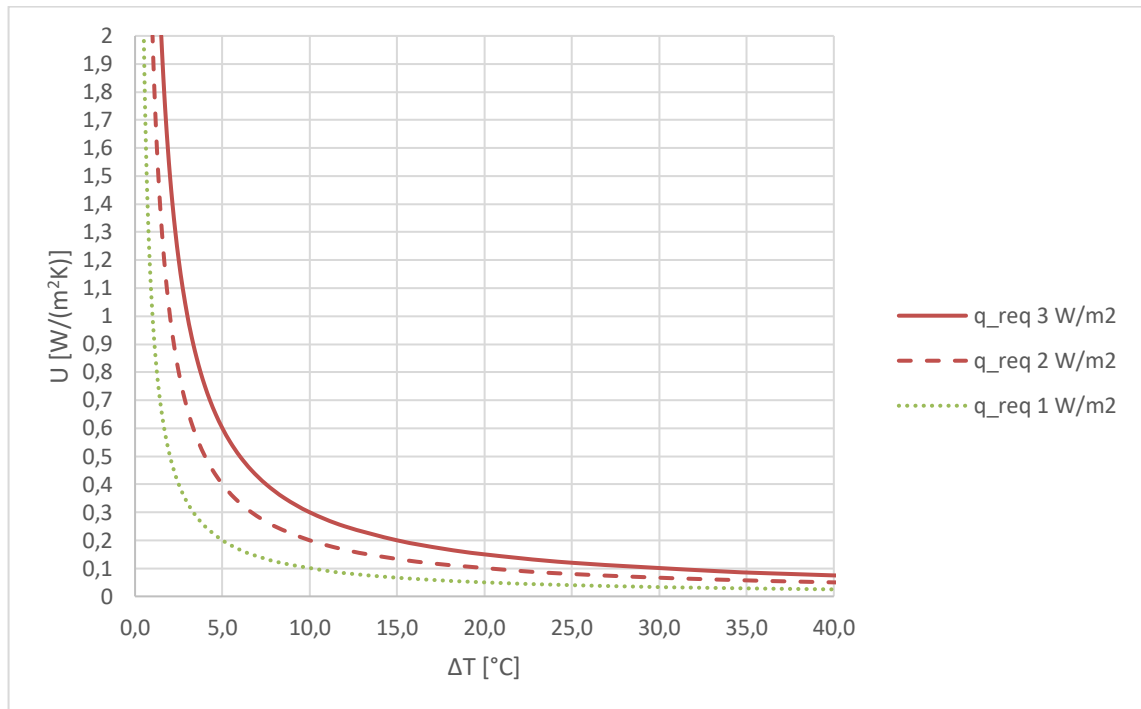
Mittauksen onnistumisen perusedellytys on se, että mitattava rakenne on termisessä stationääritilassa eli sen lämpötilakenttä pysyy muuttumattomana ennen mittausta ja sen ajan.

Tässä työssä hetkeä pidetään mittauskelpoisena, mikäli seuraavat kriteerit täyttyvät:

1. lämpövirran suunta on sisältä ulospäin
2. lämpövirran tiheys on vähintään $3,0 \text{ W/m}^2$
3. lämpövirran tiheydestä rakenteen sisäpinnalla ja sisä- ja ulkoilman lämpötila-erosta laskettu näennäinen U-arvo poikkeaa korkeintaan $5,0 \%$ SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan stationääritilassa lasketusta U-arvosta

Yllä olevien kriteerien avulla laskettiin mallinnustuloksista mitattavuuslukuja eli mitattavissa olevien hetkien määriä tunteina. Mitattavuusluvut laskettiin tunnin välein lasketusta mallinnusdatasta sekä tunnin välein mitatuista säätiedoista jokaiselle ilmansuunnalle. Mitattavuus jollekin hetkelle ilmaistaan ehtolauseena, joka voi saada arvon $1 = \text{"mitattavissa"}$ tai $0 = \text{"ei mitattavissa"}$. Mitattavuusluku on vuosi- tai kuukausi-summa näistä ehtolauseiden tuloksista. Luvut ovat karkeita mittareita sille, kuinka helposti mitattavissa kyseinen seinärakenne on. Mitä suurempi mitattavuusluku on, sitä suurempi osa vuoden hetkistä on mittauskelpoisia. Mitattavuusluvuissa voi olla mukana myös hetkiä, jolloin mittausta ei todellisuudessa kannataisi tehdä, sillä pistemäisistä lähtötiedoista laskettu näennäinen U-arvo saattaa sattumalta olla riittävän lähellä vertailuarvoa, vaikka seinärakenteen lämpötila olisikin muuttumassa nopeasti. Tämä sekoittaisi todellisen mittauksen, sillä mittaus kestää noin tunnin ja siksi mittalaite ehtisi reagoimaan tapahtumassa olevaan lämpötilanmuutokseen. Tämän vuoksi on tärkeää tarkastella myös mittauskelpoisten jaksojen pituutta, kuten on tehty jokaisen seinärakenteen kohdalla. Mikäli mittauskelpoinen jakso on riittävän pitkä, voidaan olettaa, että lähes stationääritila on saavutettu eikä kyse ole hetkellisestä, sattumalta oikeansuuruisesta U-arvosta.

Kuvassa 5.2 on esitetty tämänhetkiselä laiteversiolla mitattavissa olevat U-arvot rakenteen yli vallitsevan lämpötilaeron suhteen (yhtenäinen viiva) sekä mitattavissa olevat U-arvot tilanteissa, joissa lämpövirran minimivaatimus olisi $2,0 \text{ W/m}^2$ (katkoviiva) tai $1,0 \text{ W/m}^2$ (pisteviiva).



Kuva 5.2 *Arcadassa kehitetyllä nopealla U -arvon mittalaitteella mitattavissa oleva U -arvo rakenteen yli vallitsevan lämpötilaeron suhteen.*

Kuvasta 5.2 nähdään, että mitä suurempi lämpötilaero on, sitä paremmin lämpöä eristäviä rakenteita pystytään mittaamaan, sillä lämpövirran on oltava riittävän suuri mittauksen suorittamiseksi. Nykymääräysten mukaisen $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ lämpimän tilan ulkoseinärakenteen U -arvon mittaaminen vaatii siis tällä hetkellä vähintään $17,6 \text{ °C}$ lämpötilaeron. Mikäli laitteen avulla voitaisiin luotettavasti mitata pienempiä lämpövirtoja, esim. $1,0 \text{ W}/\text{m}^2$, vastaava rakenne vaatisi enää $5,9 \text{ °C}$ lämpötilaeron, jollainen saavutetaan ympäri vuoden. Tässä työssä kokeiltiin lämpövirran tiheyden minimivaatimuksen laskemisen vaikutusta eri rakenteille laskettuihin mitattavuuslukuihin.

Näennäisiä U -arvoja seinärakenteille laskettiin sekä laskentahetkellä vallitsevasta ulkolämpötilasta että käyttäen eri pituisia liukuvia ulkoilman lämpötilojen keskiarvoja (2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 15 h). Keskiarvot laskettiin siten, että jos n on keskiarvon tuntien määrä, niin otettiin ulkoilman lämpötilat $n-1$ tunnin ajalta ennen laskentahetkeä sekä laskentahetkellä ja laskettiin näistä keskiarvo. Tätä ulkolämpötilan keskiarvoa ja mallinnoista saatua lämpövirran tiheyttä käytettiin näennäisen U -arvon laskemiseen.

Ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen ottaa huomioon aiemmin ulkoilmassa tapahtuneet lämpötilan muutokset. Tämän voisi olettaa parantavan lasketun U -arvon tarkkuutta varsinkin lämpökapasiteetiltaan suurissa rakenteissa, joissa seinärakenteen lämpötila muuttuu huomattavasti hitaammin kuin ulkoilman lämpötila. Ulkoilman keskilämpötilan käyttö olisi mahdollista siten, ettei projektin tavoitteiden kannalta oleellinen mittausaika pitene. Ulkoilman lämpötila on helposti mitattavissa oleva suure ja voidaan tarvittaessa

saada kohtuullisella tarkkuudella esimerkiksi lähimmän sääaseman havainnoista ilman omia mittauksia.

Lämpövirran minimivaatimusten ja vaaditun mittaustarkkuuden vaihtelun, ulkolämpötilan keskiarvon käytön sekä mittausjaksojen pituuden ja sijoittumisen tarkastelut tehtiin vain pohjoisseinälle. Yksi ilmansuunta valittiin, koska kaikkia ilmansuuntia koskevien tarkastelujen tekeminen ei ole mahdollista tämän työn puitteissa. Pohjoisseinä valittiin, sillä se on Suomen olosuhteissa oletettavasti yksi parhaimpia ilmansuuntia mittauksen suorittamiseksi vähäisen viistosateen ja suoran auringon säteilyn vuoksi. Jokaiselle seinärakenteelle tehtiin erikseen oma tarkastelu ilmansuunnan ja vuodenajan vaikutuksesta mitattavuuslukuihin. Kaikki edellä mainitut tarkastelut tehtiin käyttäen sekä Vantaan 2007 että Jokioisten 2004 testivuoden olosuhteita.

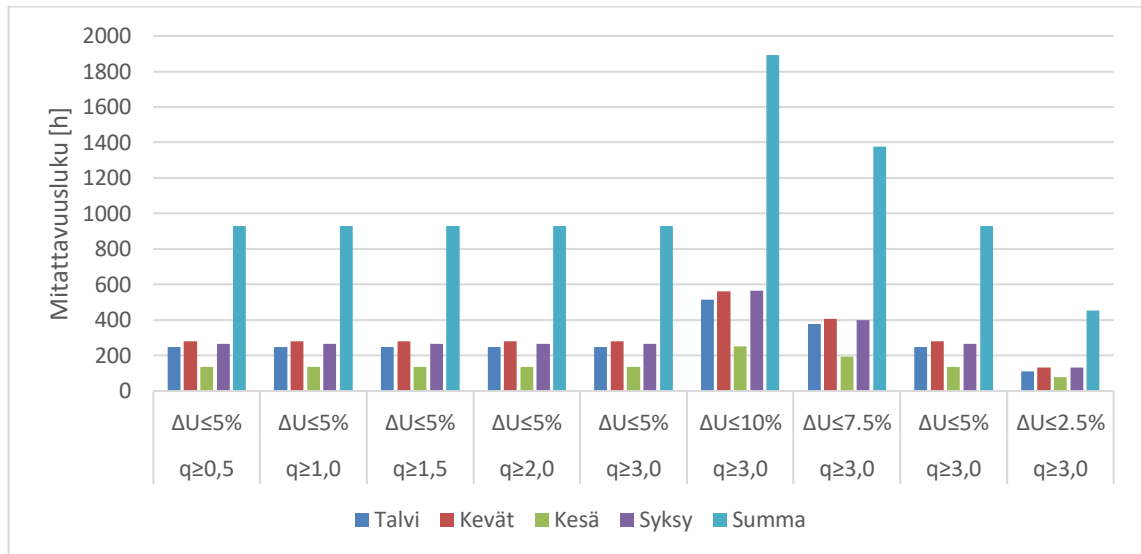
5.4.1 W1 Massiivitiiliseinä

Mitattavuuden kriteerien vaikutus

Taulukoissa 5.1 ja 5.2 sekä kuvissa 5.3 ja 5.4 on esitettyä laskennallisten tulosten mukaisia mittauskelpoisten tuntien lukumääriä vaihtaen mitattavuuden kriteereistä erikseen lämpövirran minimivaatimusta ja sallittua poikkeamaa U-arvon vertailuarvosta. Näin voidaan päätellä, onko mitattavuutta rajoittava tekijä liian pieni lämpövirta vai liian kaukana vertailuarvosta oleva näennäisen U-arvon mittaustulos. Lämpövirran minimivaatimusta vaihdeltiin välillä $0,5 \dots 3,0 \text{ W/m}^2$ ja U-arvon sallittua virhettä välillä $2,5 \dots 10 \%$. Mittauskelpoisten tuntien lukumäärät on esitetty sekä vuodenaajoittain että vuosisummana. Kuukaudet on jaettu vuodenaikoihin siten, että kuukausista joulukuusta helmikuuhun ovat talvea, maaliskuusta toukokuuhun kevättä, kesäkuusta elokuuhun kesää ja syyskuusta marraskuuhun syksyä. Vuosisumman alapuolelle taulukoihin on laskettu vuosisumman osuus koko vuoden tunneista eli kuinka monta prosenttia koko vuoden tunneista on mittauskelppoisia eri kriteerejä käyttäen.

Taulukko 5.1 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 ilmatossa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

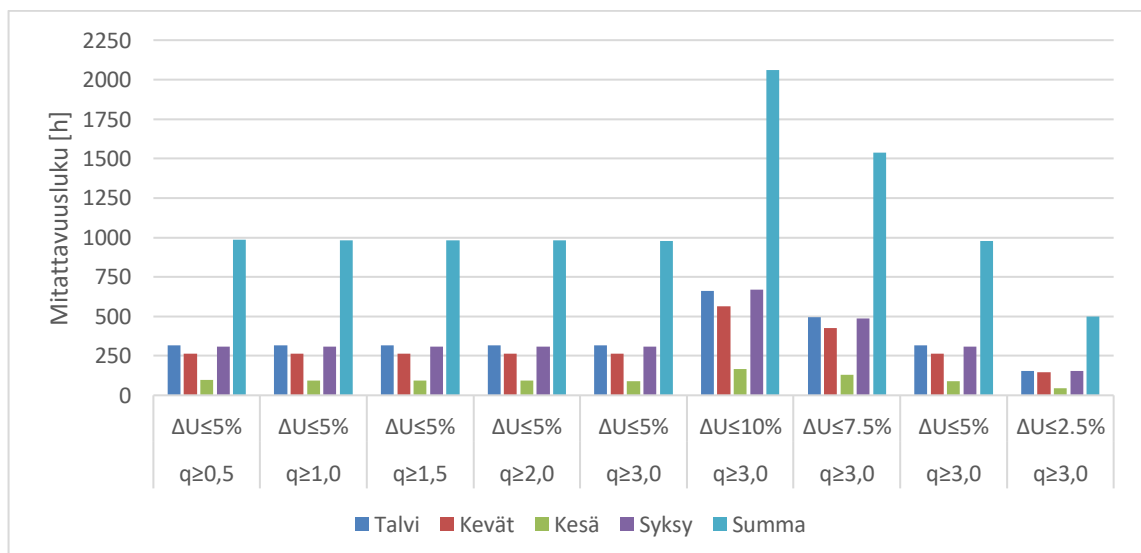
	$q \geq 0,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 2,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 10\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 7.5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 2.5\%$
SUMMA	931	930	930	930	929	1892	1378	929	455
OSUUS	11 %	11 %	11 %	11 %	11 %	22 %	16 %	11 %	5 %



Kuva 5.3 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 ilmassa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoin.

Taulukko 5.2 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 ilmassa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	q≥0,5 ΔU≤5%	q≥1,0 ΔU≤5%	q≥1,5 ΔU≤5%	q≥2,0 ΔU≤5%	q≥3,0 ΔU≤5%	q≥3,0 ΔU≤10%	q≥3,0 ΔU≤7.5%	q≥3,0 ΔU≤5%	q≥3,0 ΔU≤2.5%
SUMMA	985	983	982	982	976	2062	1538	976	500
OSUUS	11 %	11 %	11 %	11 %	11 %	24 %	18 %	11 %	6 %



Kuva 5.4 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 ilmassa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoin.

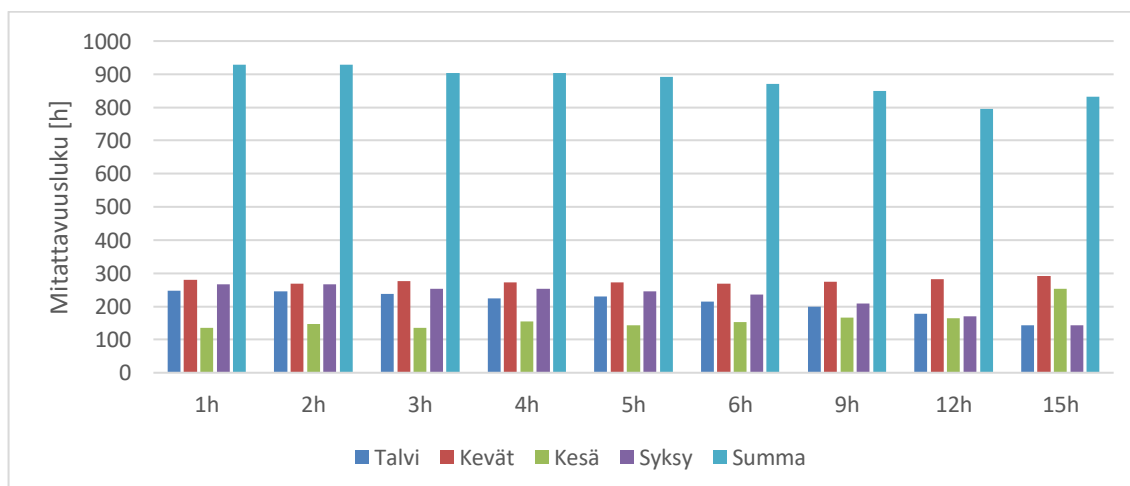
Taulukoista 5.1 ja 5.2 sekä kuvista 5.3 ja 5.4 voidaan päätellä, että mittauskelpoisten hetkien määrää rakenteella W1 rajoittaa eniten U-arvon tarkkuusvaatimus. Mikäli U-arvon sallittua poikkeamaa vertailuarvosta kasvatettaisiin 5,0 %:sta 7,5 %:iin, mittauskelpoisten tuntien määrä kasvaisi Jokioisten 2004 testivuoden ilmastossa noin 48 % ja Vantaan 2007 testivuoden ilmastossa noin 58 %. Sallitun poikkeaman kasvattaminen 10 %:iin noin kaksinkertaistaisi mittauskelpoisten tuntien määrän verrattuna tilanteeseen, jossa sallittu poikkeama on 5,0 %. Seinärakenne W1 on heikosti lämpöä eristävä ($U = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), joten lämpövirran tiheys on koko ajan melko suuri, eikä tästä syystä lämpövirran tiheyden minimirajoituksen muuttamisella ole käytännössä vaikutusta mittauskelpoisten tuntien määrään. Kesällä mittauskelpoisten tuntien määrä kasvaa hieman, mikäli lämpövirran tiheyden minimivaatimusta pienennetään.

Ulkoilman keskilämpötilan käytön vaikutus

Taulukoissa 5.3 ja 5.4 sekä kuvissa 5.5 ja 5.6 esitetään, miten eri pituisten ulkolämpötilan liukuvien keskiarvojen käyttö U-arvon laskennassa vaikuttaa mittauskelpoisten tuntien määrään vuodenaika- ja vuositasolla. Lisäksi vuosisumman alapuolella taulukossa on esitetty mittauskelpoisten tuntien osuus koko vuoden tunneista prosentteina.

Taulukko 5.3 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

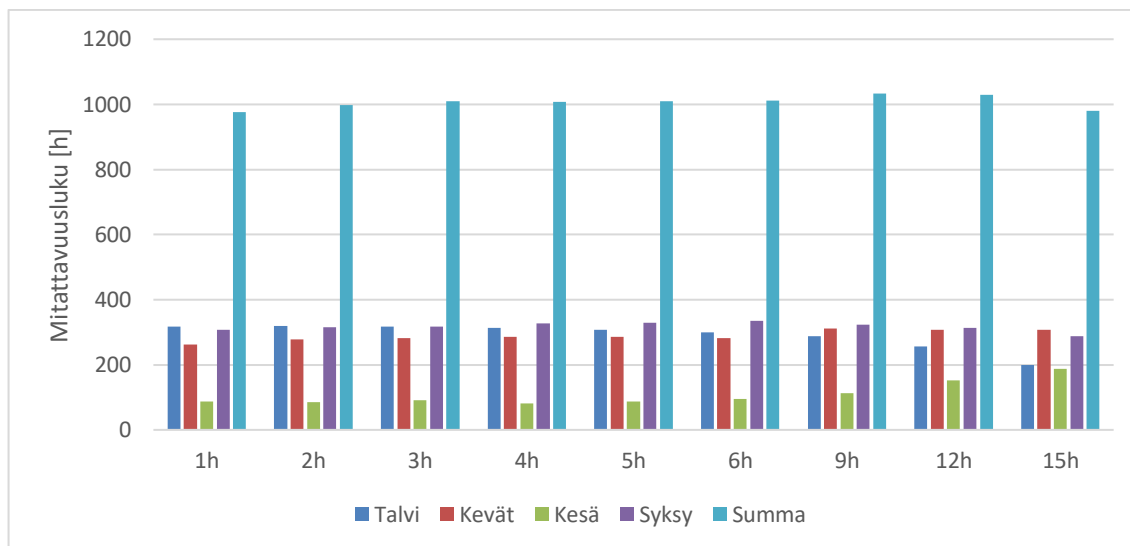
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	929	929	903	904	892	871	849	796	833
OSUUS	11 %	11 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	9 %	10



Kuva 5.5 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoin.

Taulukko 5.4 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	976	998	1009	1007	1010	1011	1034	1029	981
OSUUS	11 %	11 %	12 %	11 %	12 %	12 %	12 %	12 %	11



Kuva 5.6 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoittain.

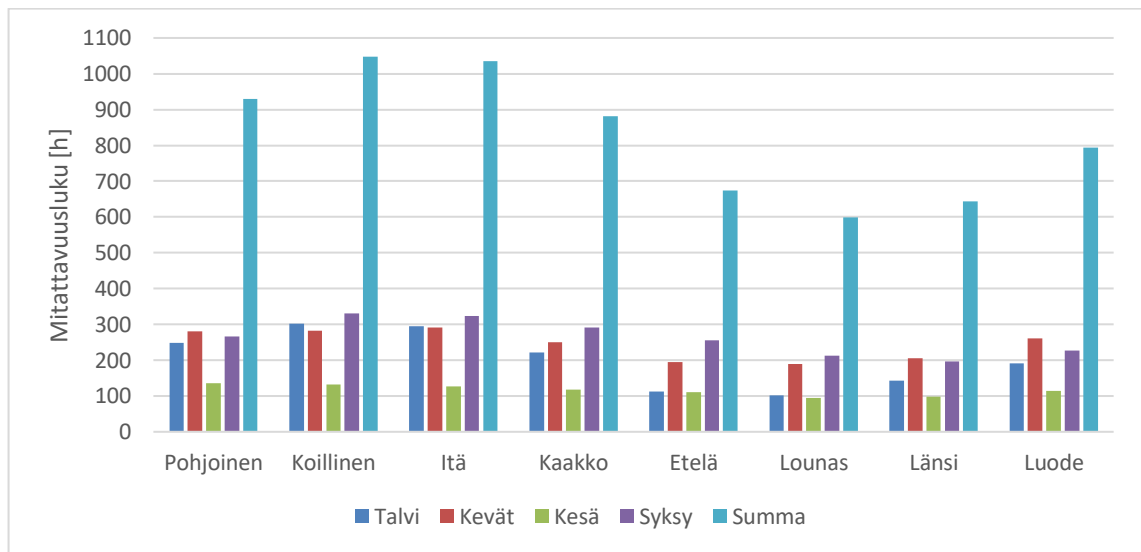
Ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen kasvattaa Vantaan 2007 testivuodella tehdyissä mallinnoissa mittauskelpoisten tuntien määrää keskiarvon pituuden kasvaessa 9 h asti, mutta hyvin vähän. Jokioisten 2004 testivuodella tehtyjen laskelmien mukaan ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen ei lisää mittauskelpoisten hetkien määrää lainkaan. U-arvon mittaustulosten tarkkuus kuitenkin lisääntyy, varsinkin massiivisilla rakenteilla, liukuvan keskiarvon laskenta-ajan pidentyessä.

Ilmansuunnan vaikutus

Taulukoissa 5.5 ja 5.6 sekä kuvissa 5.7 ja 5.8 on esitetty ilmansuunnan ja vuodenaajan vaikutuksia mittauskelpoisten tuntien määrään vuosi- ja kuukausitasolla sekä vuodenaajoittain. Lisäksi on laskettu mittauskelpoisten tuntien osuus koko vuoden tunneista prosentteina joka ilmansuunnalle sekä jokaisen kuukauden keskimääräinen mittauskelpoisten tuntien osuus (sarake K.A.) koko kuukauden tunneista ottaen huomioon kaikki ilmansuunnat.

Taulukko 5.5 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

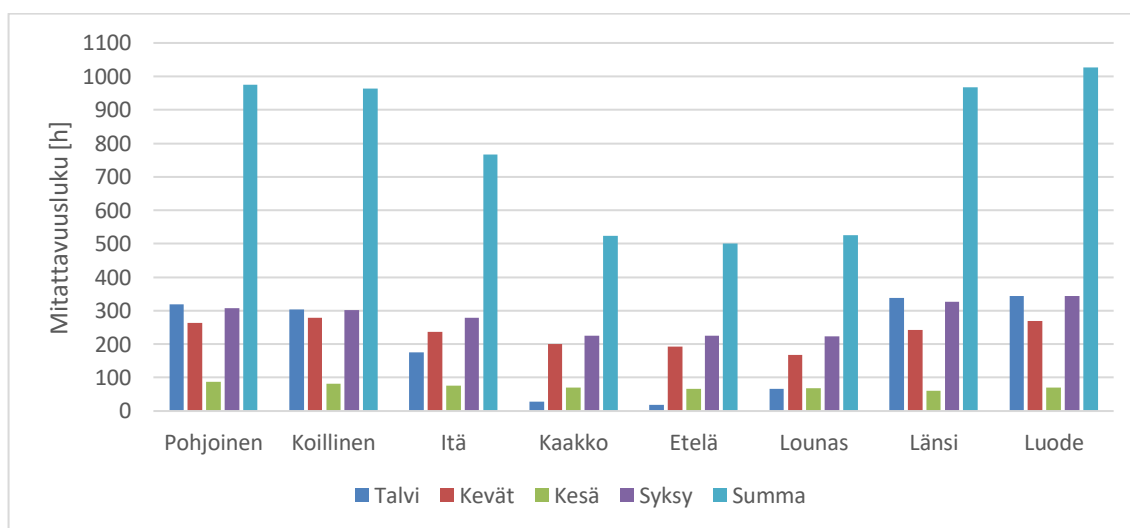
	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	117	127	126	104	53	41	63	92	12 %
Helmi	70	82	75	67	39	43	65	64	9 %
Maalis	97	106	118	88	59	57	71	98	12 %
Huhti	105	104	104	99	76	71	73	95	13 %
Touko	78	72	69	63	60	61	62	68	9 %
Kesä	59	64	66	55	46	44	51	52	8 %
Heinä	38	37	34	36	31	28	27	29	4 %
Elo	38	31	26	26	33	23	20	33	4 %
Syys	94	108	111	104	88	81	87	87	13 %
Loka	101	123	113	92	93	87	71	97	13 %
Marras	71	100	100	96	75	45	38	43	10 %
Joulu	61	93	93	51	21	17	15	35	6 %
SUMMA	929	1047	1035	881	674	598	643	793	825
OSUUS	11 %	12 %	12 %	10 %	8 %	7 %	7 %	9 %	9 %



Kuva 5.7 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.

Taulukko 5.6 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Vantaan 2007 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	174	173	97	0	0	23	169	176	14 %
Helmi	69	69	65	28	18	42	81	69	8 %
Maalis	111	103	64	45	48	38	73	115	10 %
Huhti	96	102	94	86	76	77	96	92	12 %
Touko	56	74	78	69	68	53	74	63	9 %
Kesä	33	34	32	28	28	24	25	27	4 %
Heinä	24	22	21	22	17	21	15	22	3 %
Elo	31	25	23	20	21	23	20	22	3 %
Syys	82	81	96	82	99	89	85	83	12 %
Loka	105	112	117	96	90	77	97	108	13 %
Marras	120	108	65	48	36	57	144	152	13 %
Joulu	75	61	14	0	0	2	88	98	6 %
SUMMA	976	964	766	524	501	526	967	1027	782
OSUUS	11 %	11 %	9 %	6 %	6 %	6 %	11 %	12 %	9 %



Kuva 5.8 Seinärakenteelle W1 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Vantaan 2007 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenoittain.

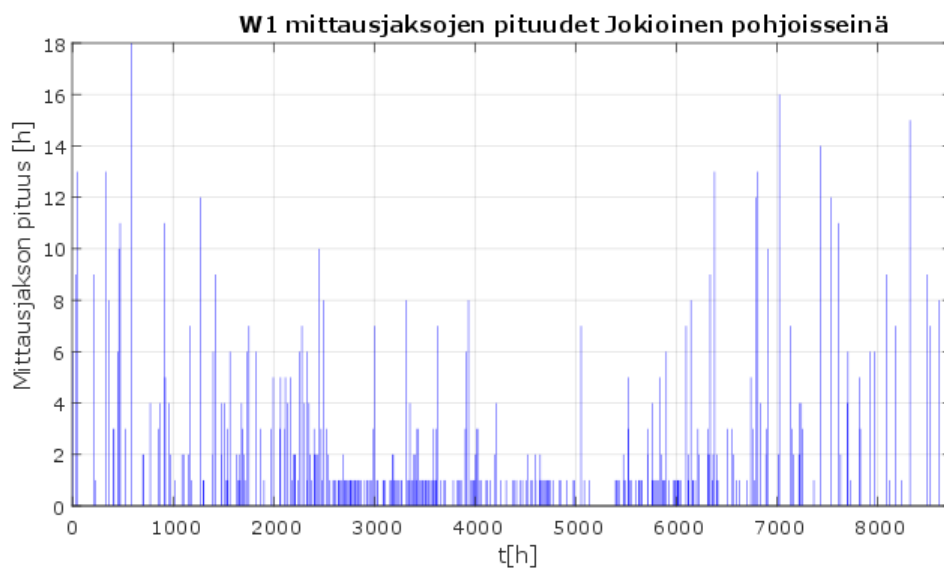
Seinärakenteen W1 tapauksessa sekä Jokioisten 2004 että Vantaan 2007 testivuodella tehdyissä mallinuksissa seinärakenteen suuntauksella havaittiin olevan merkittävä vaikutus mittauskelpoisten hetkien määrään, erityisesti tutkittaessa Vantaan 2007 testivuotta. Parhaimman ilmansuunnan mittauskelpoisten tuntien määrä on 75 % (Jokioinen 2004) ja 105 % (Vantaa 2007) korkeampi kuin huonoimman ilmansuunnan. Mittauskelpoisten hetkien määrä on suurimmillaan niissä ilmansuunnissa, joihin kohdistuu vähiten suoraa auringon paistetta sekä viistosadetta. Matalin mitattavuusluku osuu kummassakin ilmastossa siihen ilmansuuntaan, josta tulee eniten viistosadetta. Tästä voidaan päätellä,

että viistosade heikentää merkittävästi U-arvon mittausmahdollisuuksia seinärakenteella W1. Tätä päätelmää tukee myös luvussa 5.2 kuvattu kosteudensiirron suuri vaikutus lämpövirran tiheyteen tällä rakenteella. Vantaan 2007 testivuoden mallinnuksissa mittauskelpoisia tunteja on runsaalle sateelle altistetuissa suunnissa vähemmän kuin Jokioisten 2004 testivuodella tehdyissä mallinnuksissa, mikä on luonnollista, sillä Vantaan 2007 testivuosi on sateisempi kuin Jokioisten 2004 testivuosi.

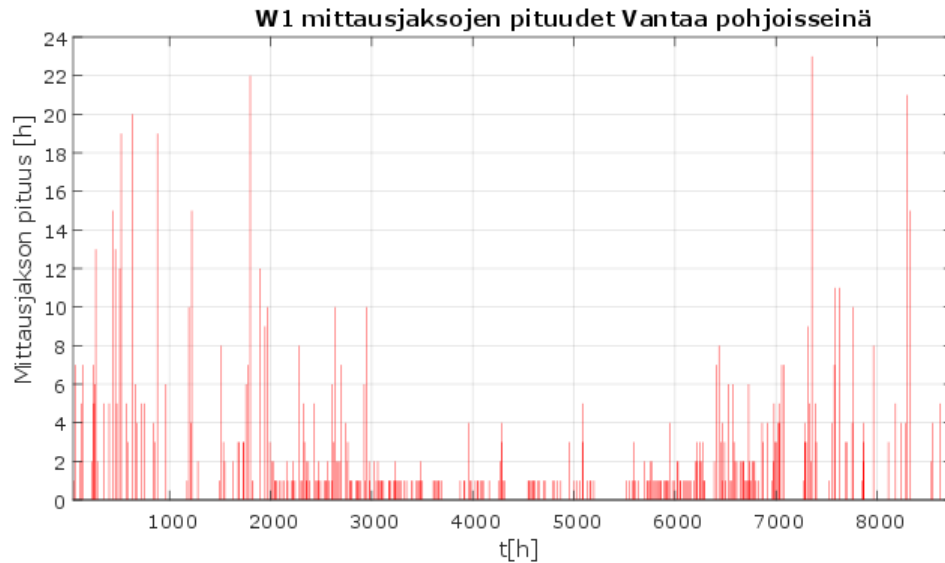
Mittauskelpoisten tuntien määrä on suurimmillaan tammi-huhtikuussa sekä syys-joulukuussa. Joulukuu oli Vantaalla 2007 lämmin ja sateinen, mikä näkyy matalina mitattavuuslukuina. Kuitenkin sateisina kuukausina etelän ja lännen välillä mittauskelpoisia tunteja on vähän myös kuukausina, jolloin mitattavuusluvut ovat muuten korkeita. Ilmansuuntien välisten erojen huomattiin korostuvan marras-huhtikuussa (Jokioinen 2004) ja marras-maaliskuussa (Vantaa 2007) eli nimenomaan kylmänä vuodenaikana. Kokonaisuutena Jokioisten 2004 testivuoden mitattavuusluvut ovat hieman korkeampia kuin Vantaan 2007 testivuoden mitattavuusluvut.

Mittauskelpoisten jaksojen pituudet ja sijoittuminen

Seuraavat kuvat 5.9 ja 5.10 esittävät mittausjaksojen pituuksia ja sijoittumista vuodenajan mukaan. Mittausjaksojen pituudet on laskettu käyttäen sallittuna näennäisen U-arvon poikkeamana vertailuarvosta $\pm 5\%$. Kuvissa 5.9 ja 5.10 on vaaka-akselilla aika tunteina ja pystyakselilla mittausjakson pituus tunteina. Mikäli pylvästä ei jossain kohdassa ole, tarkoittaa se, että sillä hetkellä U-arvo ei ole mitattavissa. Pylväät ovat sijoittuneet jakson alkuajankohdan kohdalle, joten pitkän mittauskelpoisen jakson jälkeen on oltava yhtä monta tuntia pitkä aukko vaaka-akselilla.



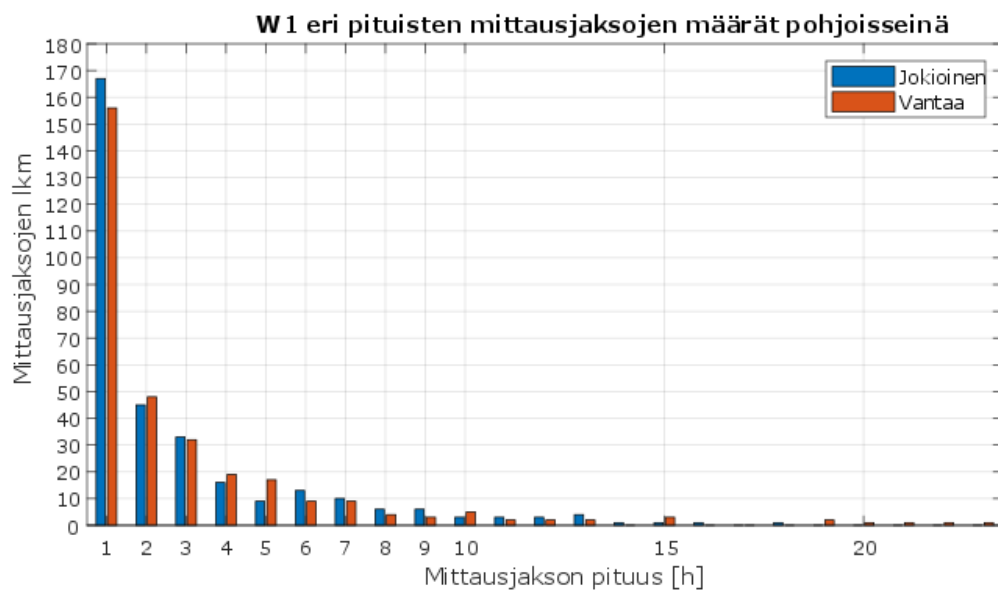
Kuva 5.9 Seinärakenteelle W1 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen Jokioisten 2004 ilmastossa pohjoisseinällä.



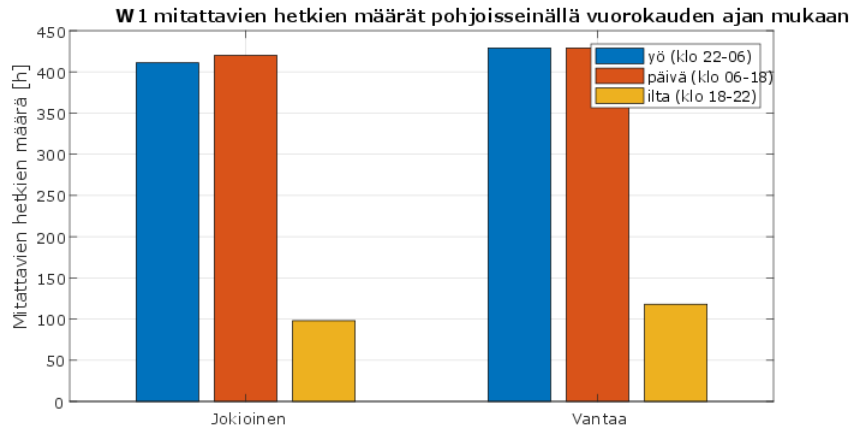
Kuva 5.10 Seinärakenteelle W1 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä.

Lyhyet mittauskelpoiset jaksot sijoittuvat pääasiassa kesäaikaan ja pidemmät jaksot syys- ja talviaikaan, kuten kuvista 5.9 ja 5.10 selviää. Havaitaan myös, että kesäaikaan ja loppuvuodesta on pitkäköjä jaksot, jolloin mitattavia hetkiä ei ole lainkaan.

Kuvassa 5.11 esitetään seinärakenteelle W1 laskettujen eri pituisten mittauskelpoisten jaksotien lukumääriä ja kuvassa 5.12 mittauskelpoisten jaksotien sijoittuminen vuorokauden ajan mukaan. Molemmissa kuvissa esitetyt tarkastelut on tehty pohjoiseen suunnatulle seinälle sekä Vantaan 2007 että Jokioisten 2004 testivuoden olosuhteilla.



Kuva 5.11 Seinärakenteelle W1 lasketut eri mittaiset mittausjaksot Jokioisten 2004 ja Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä.



Kuva 5.12 Seinärakenteen W1 mittauskelpoisten tuntien sijoittuminen vuorokaudenajan mukaan.

Kuten kuvasta 5.11 nähdään, hyvin lyhyiden mittauskelpoisten jaksojen osuus on suuri. Vain 1 tai 2 h mittaisia jaksoja on yhteensä 322 jaksosta (66 %) Jokioisten 2004 ilmastossa ja 204 yhteensä 317 jaksosta (64 %) Vantaan 2007 ilmastossa. Mittauskelpoisesta ajasta 1-2 h jaksot muodostavat 28 % (Jokioinen 2004) ja 26 % (Vantaa 2007). Vähintään 6 h mittaisia jaksoja on yhteensä 16 % (Jokioinen 2004) ja 14 % (Vantaa 2007). Kokonaisuutena nämä vähintään 6 h jaksot muodostavat 50 % (Jokioinen 2004) ja 48 % (Vantaa 2007) mittauskelpoisesta ajasta. Kuvasta 5.12 nähdään, että mittauskelpoisista tunneista noin 44 % sijoittuu yöaikaan. Tämä on enemmän kuin yöajan osuus vuorokaudesta (33 %), joten yöaikaan sijoittuu suhteellisesti merkittävästi enemmän mittauskelpoisia tunteja kuin päivään. Ilta-ajan tunnit eivät ole suoraan vertailukelpoisia yön ja päivän tunteihin, sillä ilta-aika on määritetty kestoltaan lyhyemmäksi kuin yö ja päivä.

Seinärakenteelle W1 mallinnuksista saadun lämpövirran perusteella laskettu näennäinen U-arvo on suuren osan kylmästä vuodenaikasta korkeampi kuin stationääritilassa laskettu vertailuarvo (ks. liite 6). Syy tälle on selvästi materiaalien kosteuspitoisuus, jota SFS-EN ISO 6946:2017 mukaisissa laskelmissa ei oteta huomioon, vaikka tiiliseinä ei ole todellisuudessa koskaan täysin kuiva. Myöskään lämpökapasiteetin, latentin lämmön, auringon säteilyn tai pitkäaaltoisen säteilyn vaikutuksia ei oteta huomioon ISO-standardin mukaisessa U-arvossa. Kesäaikaan näennäinen U-arvo on lähempänä vertailuarvoa.

Yhteenvedon seinärakenteen W1 osalta voidaan todeta, että massiivitiiliseinä on U-arvon mittaamisen kannalta haastava rakenne. Mittauskelpoisia hetkiä on vain noin 10 % vuodesta. Lisäksi noin 26-28 % mittauskelpoisesta ajasta sijoittuu kestoltaan korkeintaan 2 h mittaisen jaksojen ajalle. Mittaukset tulisi pyrkiä ajoittamaan vuoden 2 500 ensimmäisen ja viimeisen tunnin ajalle, jolloin pidempiä mittauskelpoisia jaksoja on enemmän eli noin syyskuun puolivälin ja huhtikuun puolivälin väliselle ajalle. Ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen näennäisen U-arvon laskennassa lisää maltillisesti mittauskelpoisten tuntien määrää seinärakenteen W1 osalta. Rakenteella on korkea terminen massa, mikä hidastaa lämpövirran tiheyden vaihtelua rakenteen sisäpinnalla ulko-olosuhteiden muuttuessa.

Mittaukset kannattaisi suorittaa seinältä, johon osuu mahdollisimman vähän viistosadetta, sillä runsaalle viistosateelle altistuvilla seinillä mitattavuusluvut ovat selkeästi pienempiä kuin muihin ilmansuuntiin suunnatuilla seinillä.

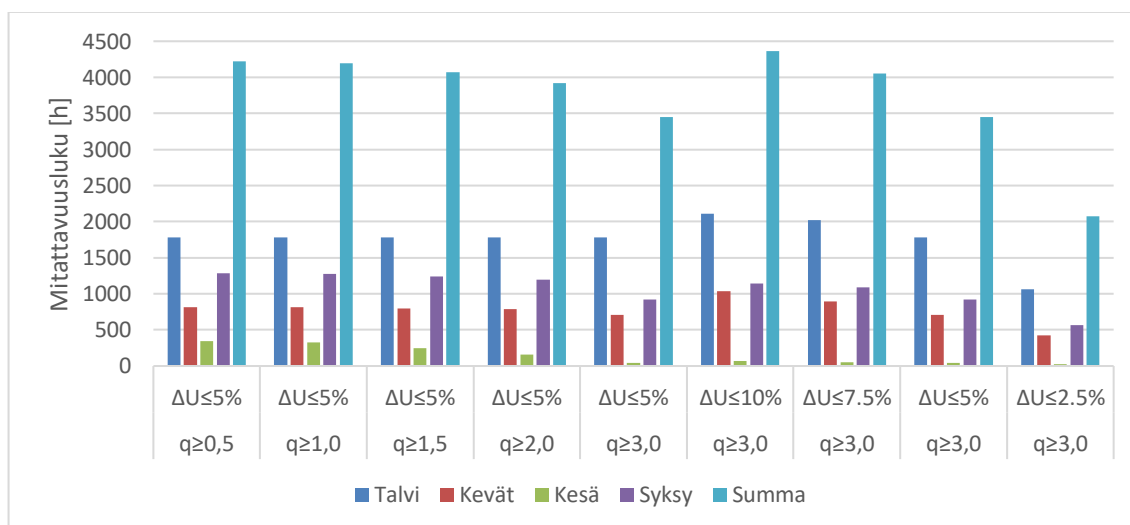
5.4.2 W2 Puurankaseinä

Mitattavuuden kriteerien vaikutus

Taulukoissa 5.7 ja 5.8 sekä kuvissa 5.13 ja 5.14 on esitettyä mittauskelpoisten tuntien lukumäärät vaihtaen mitattavuuden kriteereistä erikseen lämpövirran minimivaatimusta ja sallittua poikkeamaa U-arvon vertailuarvosta.

Taulukko 5.7 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 ilmastossa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

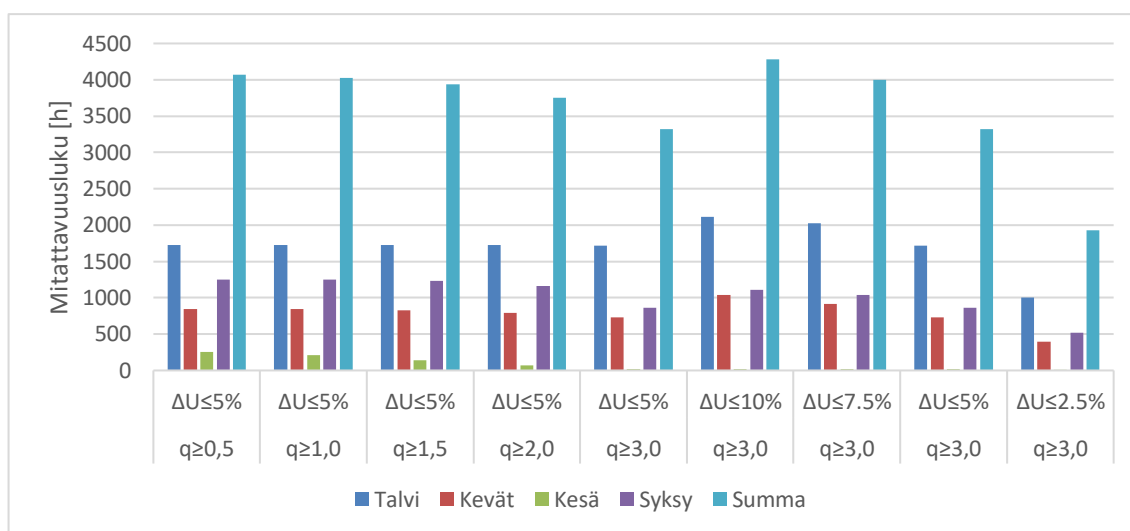
	$q \geq 0,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 2,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 10\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 7.5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 2.5\%$
SUMMA	4220	4193	4075	3923	3448	4365	4055	3448	2073
OSUUS	48 %	48 %	47 %	45 %	39 %	50 %	46 %	39 %	24



Kuva 5.13 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 ilmastossa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoittain.

Taulukko 5.8 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	$q \geq 0,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 2,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 10\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 7,5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 2,5\%$
SUMMA	4070	4025	3934	3753	3323	4284	4000	3323	1926
OSUUS	46 %	46 %	45 %	43 %	38 %	49 %	46 %	38 %	22



Kuva 5.14 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoin.

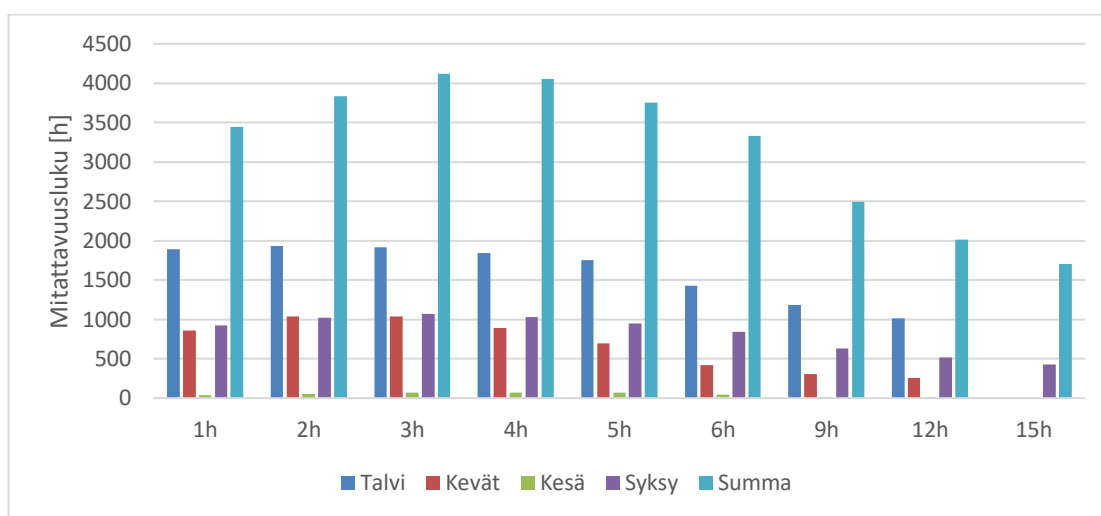
Taulukoista 5.7 ja 5.8 sekä kuvista 5.13 ja 5.14 voidaan havaita, että myös seinärakenteen W2 tapauksessa mitattavuuden kriteereistä merkittävämpi vaikutus on U-arvon tarkkuusvaatimuksella. Mikäli mitattu U-arvo saa poiketa referenssiarvosta 5,0 % sijaan 7,5 %, mittauskelpoisten hetkien määrä kasvaa noin 17-20 %. Kasvua tapahtuu kaikkina vuodenaikoina, mutta kesällä hyvin vähän. Vaikka U-arvon tarkkuusvaatimus onkin kriteereistä merkittävämpi, voidaan myös lämpövirran tiheyden minimivaatimuksen muuttamisen vaikutukset havaita selkeästi. Koska seinärakenne W2 on suhteellisen hyvin lämpöä eristävä ($U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$), kasvaisi mittauskelpoisten hetkien määrä lämpimään vuodenaikaan jonkin verran, mikäli lämpövirran tiheyden minimivaatimusta voitaisiin laskea arvosta $3,0 \text{ W/m}^2$ esimerkiksi arvoon $2,0 \text{ W/m}^2$. Tämä kasvattaisi mittauskelpoisten tuntien määrää 13-14 %. Käytännössä tämä tarkoittaisi mittauskauden pitenemistä lähemmäs kesää ja keväällä ja syksyllä tehtävien mittauksen parempaa onnistumista.

Ulkoilman keskilämpötilan käytön vaikutus

Seuraavissa taulukoissa 5.9 ja 5.10 sekä kuvissa 5.15 ja 5.16 on esitetty ulkoilman keskilämpötilan käytön vaikutusta mitattavuuslukuun.

Taulukko 5.9 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

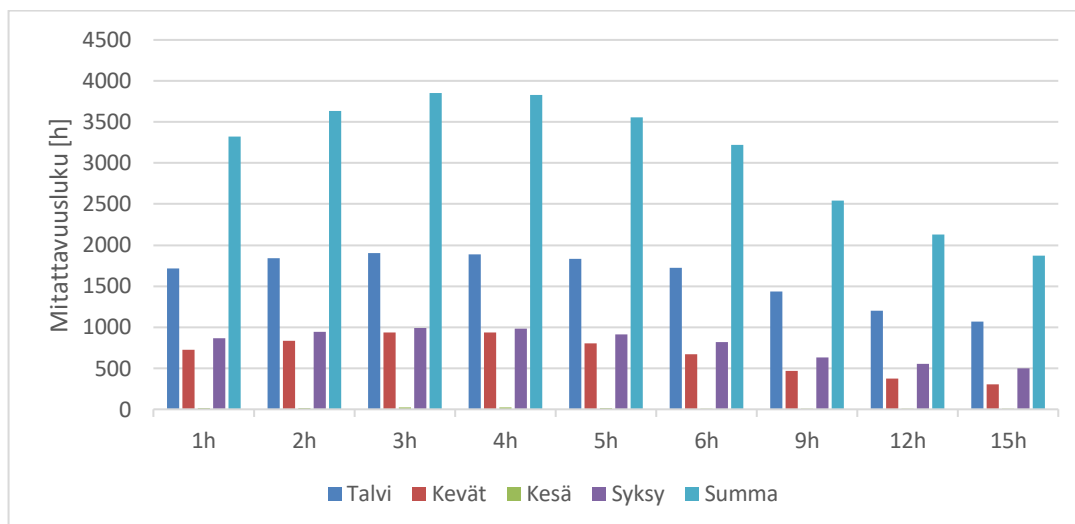
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	3448	3831	4119	4057	3753	3332	2495	2016	1708
OSUUS	39 %	44 %	47 %	46 %	43 %	38 %	28 %	23 %	19



Kuva 5.15 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoittain.

Taulukko 5.10 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	3323	3636	3855	3829	3559	3220	2540	2130	1870
OSUUS	38 %	42 %	44 %	44 %	41 %	37 %	29 %	24 %	20



Kuva 5.16 *Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 ilmastossa eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoittain.*

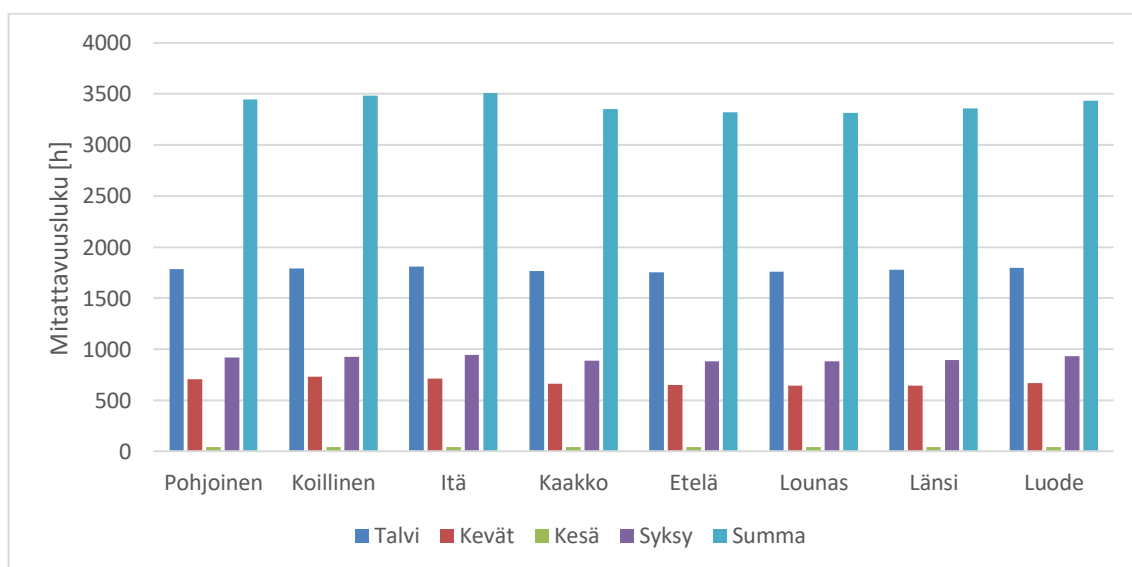
Kuvien 5.15 ja 5.16 sekä taulukoiden 5.9 ja 5.10 perusteella huomataan, että ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen U-arvon laskennassa lisää mittauskelpoisten tuntien määrää, kun liukuvan keskiarvon pituus on 5 h tai tätä lyhyempi. Korkeimmat mitattavuusluvut saatiin käyttämällä 3 h ajalta laskettua keskiarvoa ulkoilman lämpötilasta. Keskilämpötilan laskeminen enintään 3 h ajalta lisää mittauskelpoisten tuntien määrää kaikkina vuodenaikoina. Tulos on järkevä verrattaessa selkeästi massaltaan suurempiin rakenteisiin, joilla pidemmältä ajalta lasketun ulkoilman lämpötilan keskiarvon havaittiin kasvattavan mitattavuuslukuja. Seinärakenne W2 on massaltaan kevyt rakenne, jolla ei ole suurta lämmönvarastoimiskykyä, joten rakenteen lämpötilakenttä tasaantuu melko nopeasti, kun ulkopuolen olosuhteet muuttuvat. Kuitenkin rakenne W2 on hyvin eristetty, joten lämpötilanmuutokset seinärakenteen sisäpinnalla eivät tapahdu yhtä suurina kuin ulkoilmassa.

Ilmansuunnan vaikutus

Seuraavissa taulukoissa 5.11 ja 5.12 sekä kuvissa 5.17 ja 5.18 esitetään ilmansuunnan sekä vuodenajan vaikutusta mitattavuuslukuihin.

Taulukko 5.11 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Jokioisten 2004 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

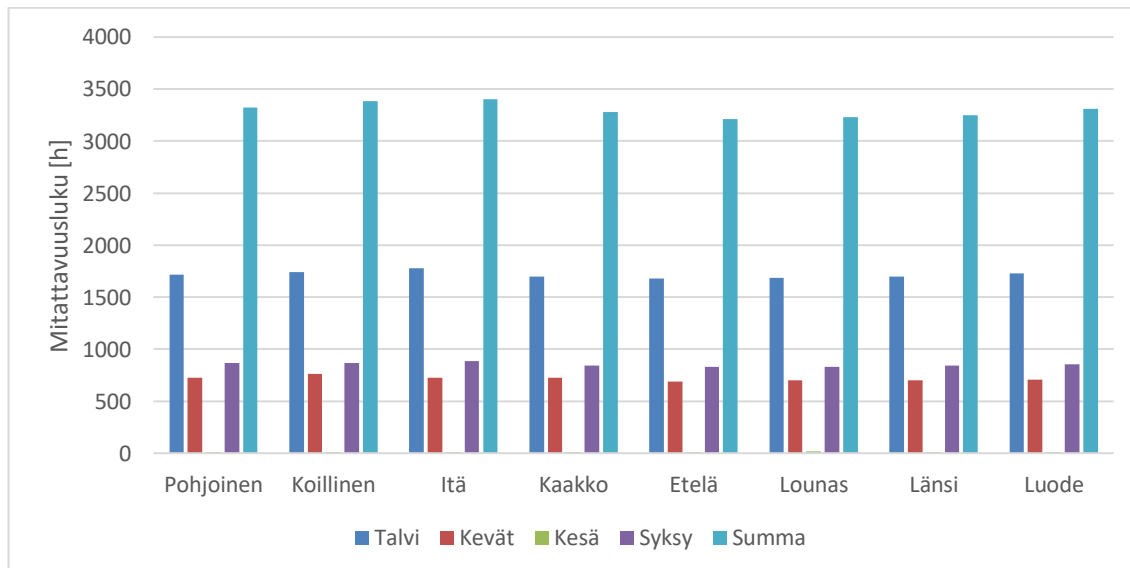
	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	640	642	647	636	633	632	642	643	86 %
Helmi	500	499	511	488	479	482	486	501	73 %
Maalis	419	421	425	396	387	388	392	414	54 %
Huhti	195	222	205	196	187	173	177	180	27 %
Touko	91	84	84	71	76	80	75	76	11 %
Kesä	30	30	29	29	33	30	31	29	4 %
Heinä	2	3	3	3	3	3	3	3	0 %
Elo	8	8	8	6	6	6	7	7	1 %
Syys	27	26	31	32	28	25	25	26	4 %
Loka	328	333	340	317	309	315	310	326	43 %
Marras	565	567	573	537	541	541	560	577	77 %
Joulu	643	652	654	643	638	642	652	654	87 %
SUMMA	3448	3487	3510	3354	3320	3317	3360	3436	3404
OSUUS	39 %	40 %	40 %	38 %	38 %	38 %	38 %	39 %	39 %



Kuva 5.17 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Jokioisten 2004 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.

Taulukko 5.12 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	564	576	581	559	552	551	560	572	76 %
Helmi	486	488	519	460	452	454	460	485	71 %
Maalis	416	421	420	429	416	416	414	411	56 %
Huhti	233	250	221	218	202	211	212	224	31 %
Touko	78	90	84	78	72	75	73	74	10 %
Kesä	2	0	0	1	1	1	1	1	0 %
Heinä	0	0	0	0	0	0	0	0	0 %
Elo	12	12	12	13	12	14	11	12	2 %
Syys	54	50	57	50	45	46	47	46	7 %
Loka	245	250	250	242	243	240	241	247	33 %
Marras	565	566	581	550	540	545	552	564	77 %
Joulu	668	679	675	678	676	680	675	674	91 %
SUMMA	3323	3382	3400	3278	3211	3233	3246	3310	3298
OSUUS	38 %	39 %	39 %	37 %	37 %	37 %	37 %	38 %	38



Kuva 5.18 Seinärakenteelle W2 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 ilmastossa laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.

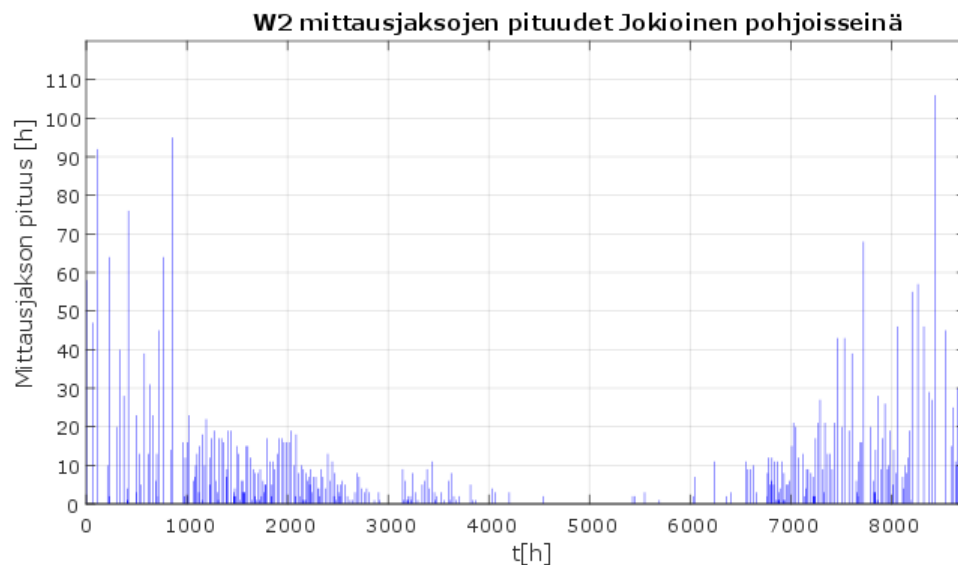
Kuvista 5.17 ja 5.18 sekä taulukoista 5.11 ja 5.12 huomataan, että parhaan ja huonoimman ilmansuunnan välinen ero mittauskelpoisten tuntien määrässä on rakenteella W2 vain noin 6 % (Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007). Jokioisten 2004 ilmastossa matalin mitattavuusluku on lounaan puoleisella ja Vantaalla 2007 etelän puoleisella seinällä. Nämä ovat

amat suunnat, joille kohdistuu eniten viistosadetta. Luoteen ja idän välisten ilmansuuntien mitattavuusluvut ovat hieman korkeampia kuin muiden ilmansuuntien. Ilmansuuntien vaikutuksen vähäisyys tällä rakenteella on järkevä tulos, sillä puurankaseinässä on tuulettuva ja sateen imeytymistä estävä lautaverhous. Tuulettuva lautaverhous aiheuttaa sen, ettei sadevesi käytännössä pääse siirtymään kapillaarisesti lämmöneristeeseen. Myös lämmönsiirto suoraan johtumalla rakenteen ulkopinnan ja muun rakenteen välillä on vähäisempää kuin muilla rakenteilla lämmöneristeenä toimivan tuuletusvälin takia.

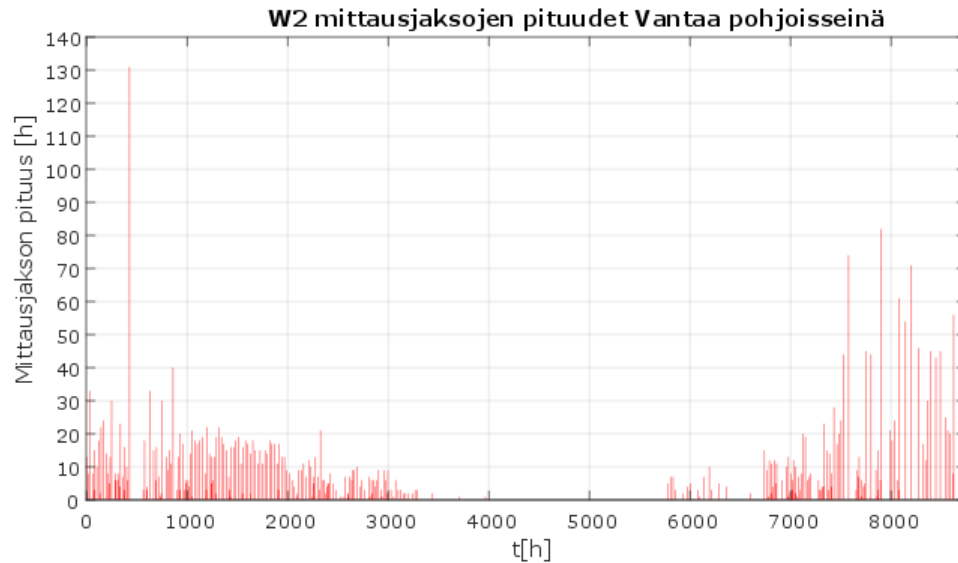
Kuukausista korkeimmat mitattavuusluvut sijoittuvat marras-helmikuulle, jolloin noin 70-90 % hetkistä on mittauskelpoisia. Myös maaliskuu- ja lokakuussa mittauskelpoisten hetkien osuus on vielä suuri, 30-60 %. Touko-syyskuussa mittauksen tekeminen on nykyisen laitteen lämpövirran minimivaatimuksella lähes mahdotonta, vaikka mitattavissa oleva näennäinen U-arvo onkin laskelmien perusteella välillä riittävän tarkka.

Mittauskelpoisten jaksojen pituudet ja sijoittuminen

Kuvissa 5.19-5.20 tarkastellaan mittausjaksojen sijoittumista sekä pituutta vuodenajan mukaan. Mittausjaksojen pituudet on laskettu käyttäen sallittuna näennäisen U-arvon poikkeamana vertailuarvosta $\pm 5 \%$.



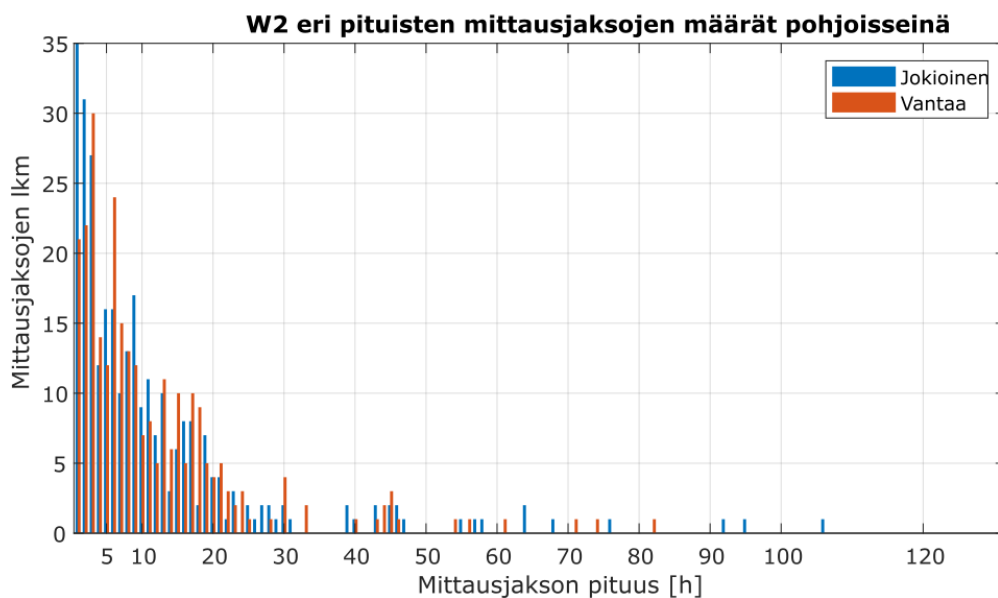
Kuva 5.19 Seinärakenteelle W2 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen Jokioisten 2004 ilmastossa pohjoisseinällä.



Kuva 5.20 Seinärakenteelle W2 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä.

Kuvista 5.19 ja 5.20 nähdään, että mittaukset tulisi tehdä vuoden 2 500 ensimmäisen ja 2 000 viimeisen tunnin aikana, jolloin mittauskelpoisia jaksoja on paljon. Tämä tarkoittaa aikaa lokakuun puolivälin ja huhtikuun puolivälin välillä.

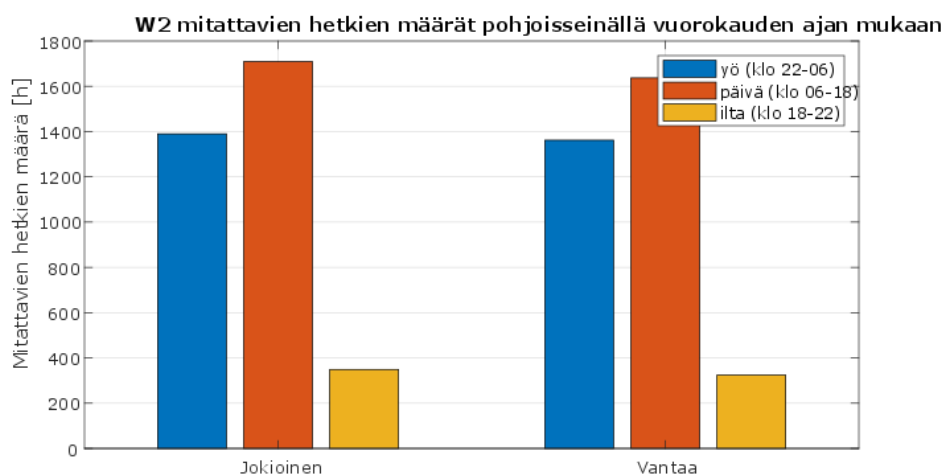
Kuvassa 5.12 esitetään seinärakenteelle W2 laskettujen eri pituisten mittauskelpoisten jaksojen lukumäärien jakaumaa.



Kuva 5.21 Seinärakenteelle W2 lasketut eri mittaiset mittausjaksot Jokioisten 2004 ja Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä.

Kuvasta 5.21 huomataan, että lyhyiden mittauskelpoisten jaksoiden määrä seinärakenteella W2 on pieni verrattuna muihin seinärakenteisiin. Korkeintaan 2 h jaksoja on 66 kpl yhteensä 292 jaksosta (Jokioinen 2004) ja 43 kpl yhteensä 279 jaksosta (Vantaa 2007). Nämä lyhyet jaksot muodostavat vain hyvin pienen osan vuoden yhteenlasketusta mittauskelpoisesta ajasta: 3 % (Jokioinen 2004) ja 2 % (Vantaa 2007). Verrattuna seinärakenteeseen W1, mittausjaksoista suuri osa on merkittävästi pidempiä seinärakenteella W2: vähintään 6 h jaksoja on 171 kpl (Jokioinen 2004) ja 180 kpl (Vantaa 2007). Vähintään 6 h jaksoiden kokonaisosuus vuoden mittauskelpoisesta ajasta on 91 % (Jokioinen 2004) ja 92 % (Vantaa 2007). On myös huomattava, että useamman vuorokauden mittaisia mittauskelpoisia ajanjaksoja esiintyy useita.

Kuvassa 5.22 esitetään mittauskelpoisten hetkien sijoittumista eri vuorokaudenaikoihin laskettuna seinärakenteelle W2.



Kuva 5.22 Seinärakenteen W2 mittauskelpoisten tuntien sijoittuminen vuorokaudenajan mukaan.

Kuvasta 5.22 nähdään, että yöaikaan sijoittuu noin 40 % (Jokioinen 2004) ja 41 % (Vantaa 2007) mittauskelpoisesta ajasta. Yön osuus vuorokaudesta on 33 %, joten yöaika on keskimäärin parempaa mittausaikaa kuin päivä. Ilta-ajan tunnit eivät ole suoraan vertailukelpoisia yön ja päivän tunteihin, sillä ilta-aika on määritetty kestoltaan lyhyemmäksi kuin yö ja päivä.

Seinärakenteelle W2 mallinnuksista saadun lämpövirran perusteella laskettu näennäinen U-arvo on kylmänä vuodenaikana hyvin lähellä stationääritilassa laskettua vertailuarvoa (ks. liite 6). Kesäaikaan näennäinen U-arvo on yleisesti vertailuarvoa matalampi. Syy tälle voi olla auringon säteilyn lämmittävä vaikutus, joka vähentää seinän läpi ulospäin siirtyvän lämmön määrää.

Yhteenvedona seinärakenne W2 on U-arvomittausten kannalta helppo rakenne, sillä pitkiä mittauskelpoisia jaksoja on paljon eikä kosteusrasituksella tai seinän ilmansuunnalla ole

kovin merkittävää vaikutusta rakenteen näennäiseen U-arvoon, toisin kuin massiivitiili-seinissä W1 ja W6. Mittaukset tulisi ajoittaa vuoden 2 500 ensimmäisen ja 2 000 viimeisen tunnin ajalle. Ulkolämpötilan keskiarvon käyttö U-arvon laskennassa noin 3 h ajalta tuottaa korkeimmat mitattavuusluvut. Rakenteen U-arvon mittaamismahdollisuudet paransivat syksyllä ja keväällä selkeästi, mikäli lämpövirran minimivaatimusta voitaisiin laskea nykyisestä.

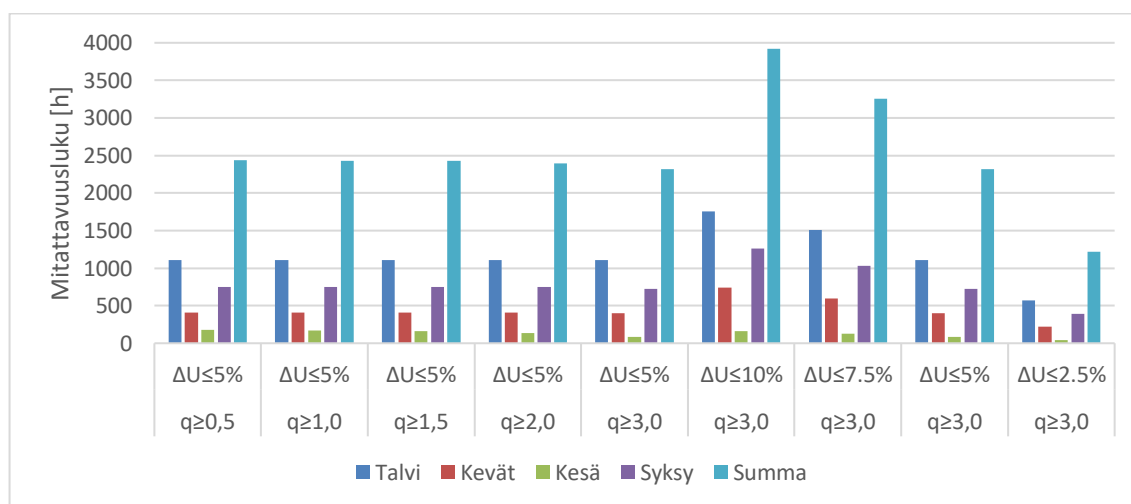
5.4.3 W3 Betonisandwich-seinä

Mitattavuuden kriteerien vaikutus

Taulukoissa 5.13 ja 5.14 sekä kuvissa 5.23 ja 5.24 on esitetty mittauskelpoisten tuntien lukumäärät vaihtaen mitattavuuden kriteereistä erikseen lämpövirran minimivaatimusta ja sallittua poikkeamaa U-arvon vertailuarvosta.

Taulukko 5.13 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 testi-vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

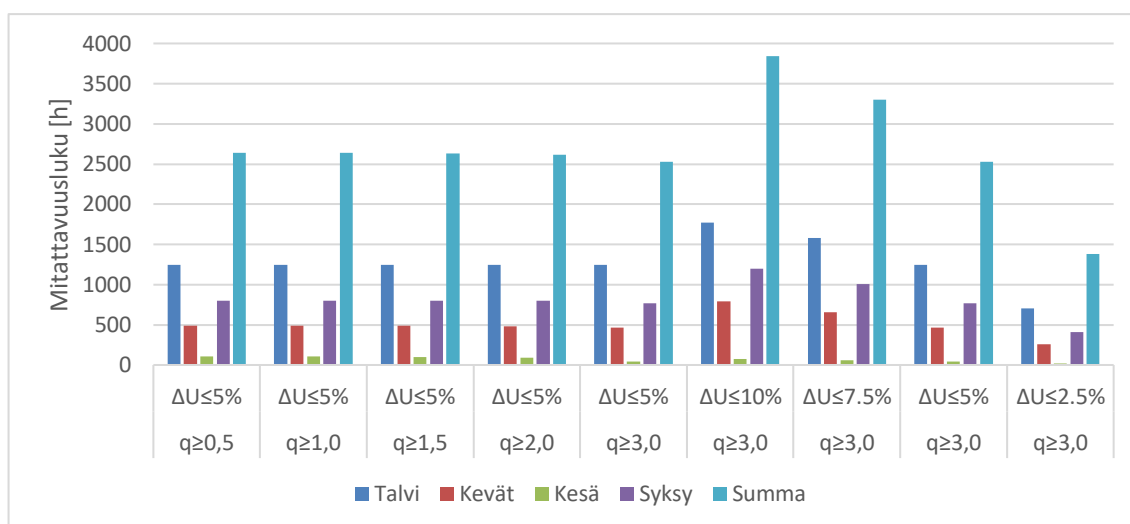
	q _{≥0,5} ΔU≤5%	q _{≥1,0} ΔU≤5%	q _{≥1,5} ΔU≤5%	q _{≥2,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤10%	q _{≥3,0} ΔU≤7.5%	q _{≥3,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤2.5%
SUMMA	2441	2432	2425	2397	2316	3922	3256	2316	1219
OSUUS	28 %	28 %	28 %	27 %	26 %	45 %	37 %	26 %	14



Kuva 5.23 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 testi-vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoittain.

Taulukko 5.14 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	q \geq 0,5 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 1,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 1,5 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 2,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 10\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 7.5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 2.5\%$
SUMMA	2643	2638	2629	2614	2527	3841	3299	2527	1379
OSUUS	30 %	30 %	30 %	30 %	29 %	44 %	38 %	29 %	15



Kuva 5.24 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoin.

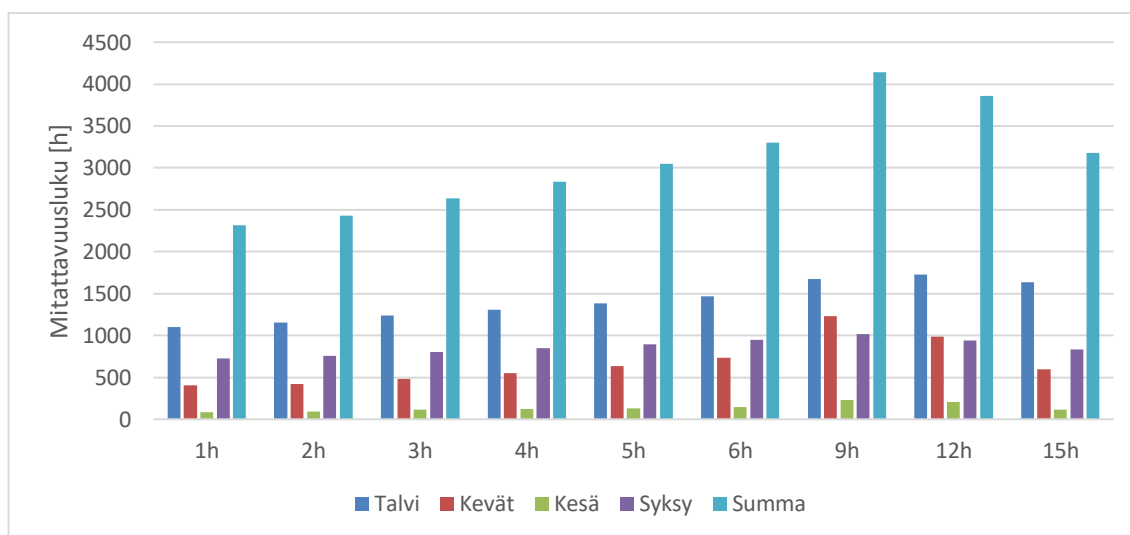
Kummassakin ilmastossa seinärakenteen W3 tapauksessa suurin mitattavuutta rajoittava tekijä on taulukoiden 5.13 ja 5.14 sekä kuvien 5.23 ja 5.24 perusteella U-arvon tarkkuusvaatimus. Jos U-arvon suurinta sallittua virhettä kasvatetaan 5,0 %:sta, kasvaa mittauskelpoisten hetkien määrä merkittävästi. Sallimalla 7,5 % poikkeama U-arvon vertailuarvosta, kasvaa mittauskelpoisten tuntien määrä Vantaan 2007 sääolosuhteissa noin 31 % ja Jokioisissa 2004 noin 41 %. Vastaavasti sallitun virheen pienentäminen 2,5 %:iin suurin vähentää mittauskelpoisten hetkien määrän noin puoleen. Seinärakenne W3 on melko hyvin lämpöä eristävä ($U = 0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$), joten lämpövirran pieni tiheys voi rajoittaa mittauksia lämpimän vuodenaikaan. Tästä syystä lämpövirran tiheyden pienimmän sallitun arvon pienentäminen arvosta $3,0 \text{ W/m}^2$ arvoon $2,0 \text{ W/m}^2$ kasvattaisi mitattavuuslukua noin 3 %.

Ulkoilman keskilämpötilan käytön vaikutus

Taulukoissa 5.15 ja 5.16 sekä kuvissa 5.25 ja 5.26 esitetään, miten ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen näennäisen U-arvon laskennassa hetkellisen ulkolämpötilan sijaan mitatun lämpövirran lisäksi vaikuttaa mittauskelpoisten tuntien määrään vuodenaika- ja vuositasolla.

Taulukko 5.15 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

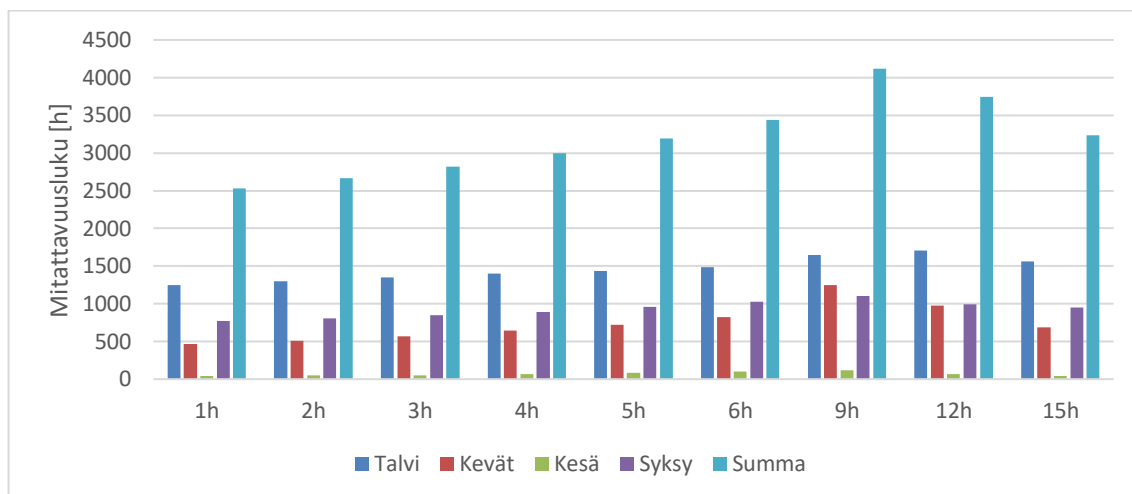
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	2316	2432	2636	2838	3047	3301	4144	3860	3179
OSUUS	26 %	28 %	30 %	32 %	35 %	38 %	47 %	44 %	36



Kuva 5.25 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoittain.

Taulukko 5.16 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	2527	2670	2819	3000	3196	3442	4114	3748	3239
OSUUS	29 %	30 %	32 %	34 %	36 %	39 %	47 %	43 %	37



Kuva 5.26 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoin.

Kuvista 5.25 ja 5.26 sekä taulukoista 5.15 ja 5.16 nähdään, että käyttämällä ulkoilman keskiarvoa näennäisen U-arvon laskennassa voidaan kasvattaa mittauskelpoisten tuntien kokonaismäärää vuositason merkittävästi, jopa lähes kaksinkertaiseksi. Ulkolämpötilan keskiarvon käyttö kasvattaa mittauskelpoisten tuntien määrää vuositason, mutta ulkoilman keskiarvon laskeminen yli 9 h ajalta ei enää paranna vaan alkaa vähentää mittauskelpoisten tuntien määrää vuositason. Kuitenkin 15 h keskiarvoa käyttämällä saatu mitattavuusluku on edelleen korkeampi kuin hetkellisestä ulkolämpötilasta laskettua U-arvoa käyttämällä saatu mitattavuusluku. Kuukausitasolla ulkoilman keskilämpötilan avulla lasketusta U-arvosta määritetty mitattavuusluku kasvaa joka kuukausi, kun keskiarvoa pidennetään 9 h asti.

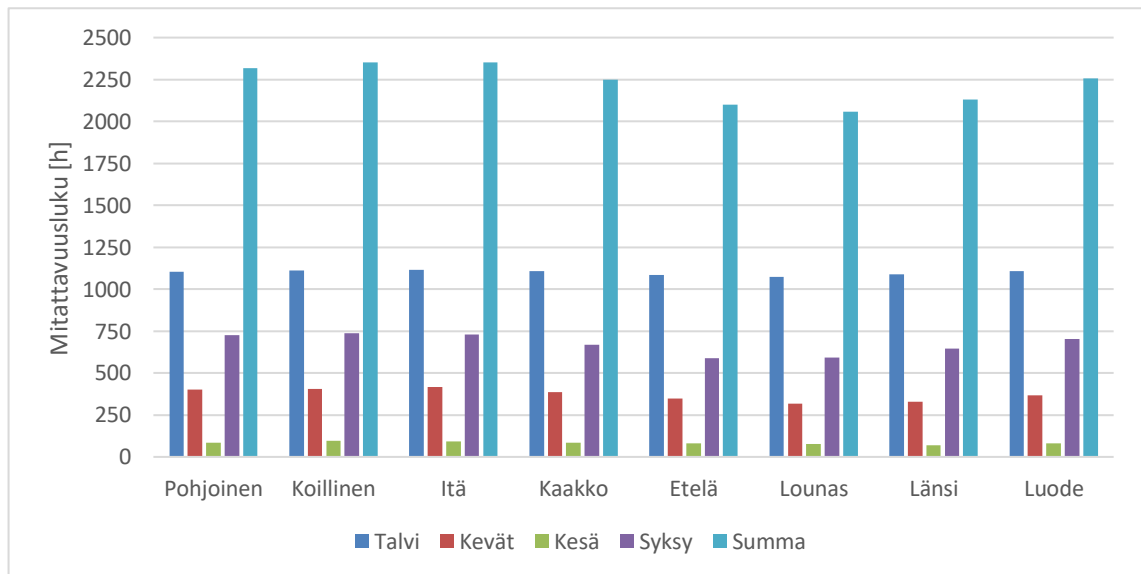
Sekä Jokioisten 2004 että Vantaan 2007 testivuoden ilmasto-olosuhteissa on seinärakenteelle W3 näiden laskelmien pohjalta suositeltavaa käyttää näennäisen U-arvon laskennassa mitatun lämpövirran tiheyden lisäksi ulkoilman keskilämpötilaa melko pitkältä ajanjaksolta, arviolta 9 h ajalta.

Ilmansuunnan vaikutus

Taulukoissa 5.17 ja 5.18 sekä kuvissa 5.27 ja 5.28 esitetään ilmansuunnan ja vuodenaajan vaikutuksia mitattavuuslukuun.

Taulukko 5.17 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

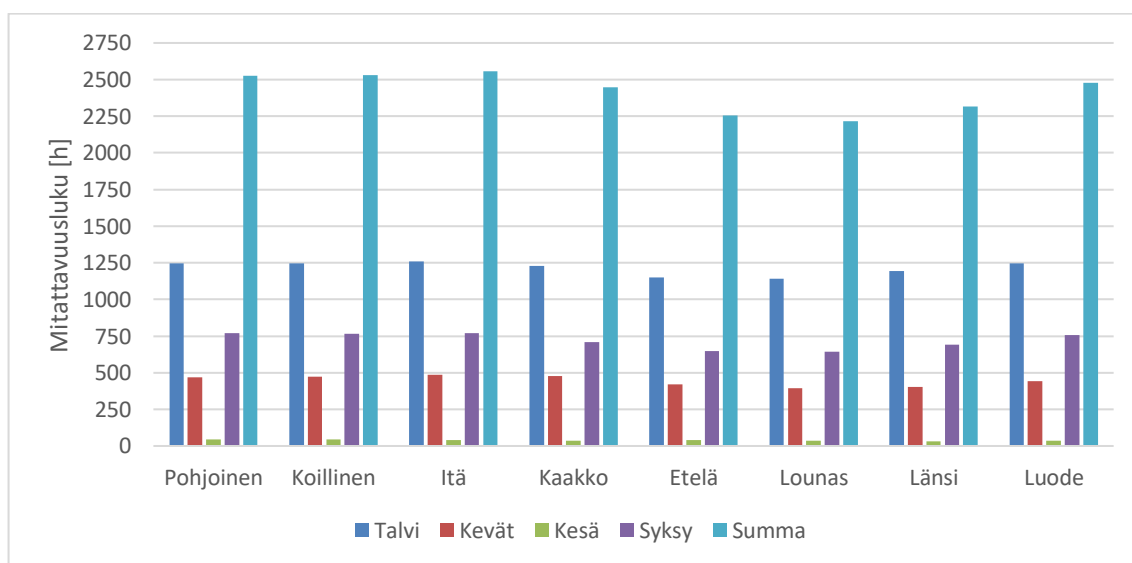
	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	407	408	406	408	405	402	400	406	54 %
Helmi	324	329	334	331	313	306	319	326	48 %
Maalis	250	250	249	248	225	202	212	242	32 %
Huhti	78	79	89	71	62	60	62	60	10 %
Touko	75	78	78	66	62	54	55	67	9 %
Kesä	46	58	58	55	52	48	42	48	7 %
Heinä	21	20	19	18	21	19	18	15	3 %
Elo	17	17	16	13	8	11	11	16	2 %
Syys	93	100	90	79	61	61	76	90	11 %
Loka	304	309	309	275	233	232	260	294	37 %
Marras	328	329	331	315	294	299	308	320	44 %
Joulu	373	375	375	369	366	365	368	374	50 %
SUMMA	2316	2352	2354	2248	2102	2059	2131	2258	2228
OSUUS	26 %	27 %	27 %	26 %	24 %	24 %	24 %	26 %	25



Kuva 5.27 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.

Taulukko 5.18 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuushuvut Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	379	373	380	360	349	344	360	382	49 %
Helmi	374	378	386	373	319	315	342	374	53 %
Maalis	307	302	310	310	287	279	281	296	40 %
Huhti	111	124	132	124	91	77	82	107	15 %
Touko	51	47	46	43	43	39	38	38	6 %
Kesä	22	25	26	23	26	20	19	21	3 %
Heinä	0	0	0	1	2	0	0	0	0 %
Elo	21	19	15	12	11	14	13	15	2 %
Syys	79	83	83	71	58	53	54	72	10 %
Loka	261	259	265	240	212	211	232	263	33 %
Marras	428	425	421	398	376	378	405	420	56 %
Joulu	494	497	493	494	482	484	491	492	66 %
SUMMA	2527	2532	2557	2449	2256	2214	2317	2480	2417
OSUUS	29 %	29 %	29 %	28 %	26 %	25 %	26 %	28 %	28



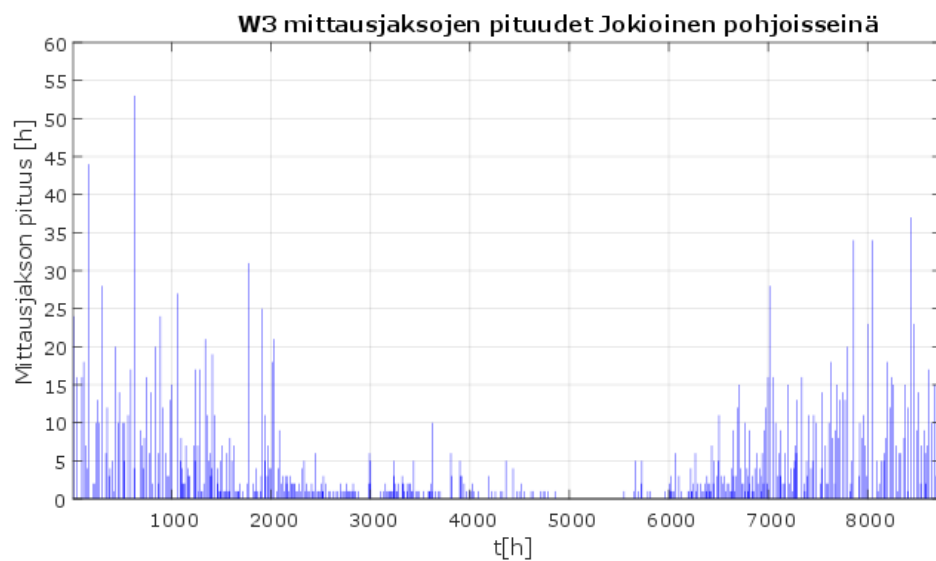
Kuva 5.28 Seinärakenteelle W3 lasketut mitattavuushuvut Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.

Kummankin testivuoden olosuhteissa (ks. taulukot 5.17 ja 5.18 sekä kuvat 5.27 ja 5.28) eniten mittauskelpoisia tunteja on luode-kaakko -välillä. Ilmansuunnan vaikutus mittauskelpoisten tuntien määrään on havaittavissa ympäri vuoden, mutta vaikutus on selkeästi pienempi kuin massiivitiilirakenteilla. Vähiten mittauskelpoisia tunteja on etelän ja lounaan puolella, jonne kohdistuu eniten viistosadetta ja auringon suoraa säteilyä. Rakenteessa W3 matalin mitattavuusluku ei ole selkeästi molempien ilmastojen mallinnusten mukaan suurimman viistosaderasituksen puoleisella seinällä, joten on vaikeaa sanoa,

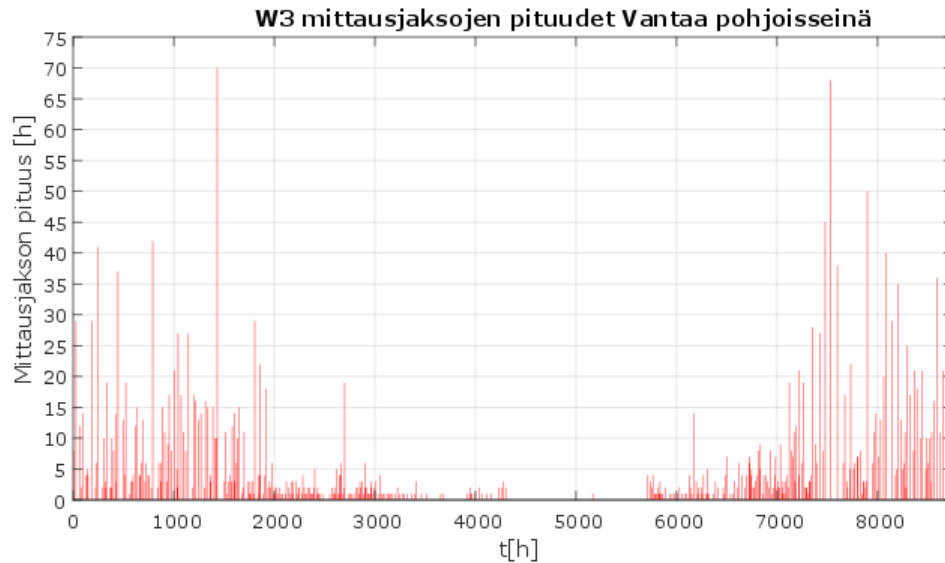
onko auringon vai viistosateen vaikutus suurempi tässä rakenteessa. Parhaan ilmansuunnan mittauskelpoisten tuntien määrä laskettuna koko vuoden ajalta on noin 15 % korkeampi verrattuna huonoimpaan suuntaan. Yksittäisten kuukausien kohdalla erot mittauskelpoisten tuntien määrissä eri ilmansuuntiin suunnatuilla seinillä voivat olla selvästi suurempia. Eniten mittauskelpoisia tunteja on loka-maaliskuussa ja selkeästi vähiten heinä- ja elokuussa. Huhti-syyskuussa mittauskelpoista aikaa on korkeintaan 15 %.

Mittauskelpoisten jaksojen pituudet ja sijoittuminen

Seuraavissa kuvissa 5.29 ja 5.30 tarkastellaan mittauskelpoisten jaksojen sijoittumista ja pituutta vuodenajan mukaan. Mittausjaksojen pituudet on laskettu käyttäen sallittuna näennäisen U-arvon poikkeamana vertailuarvosta ± 5 %.



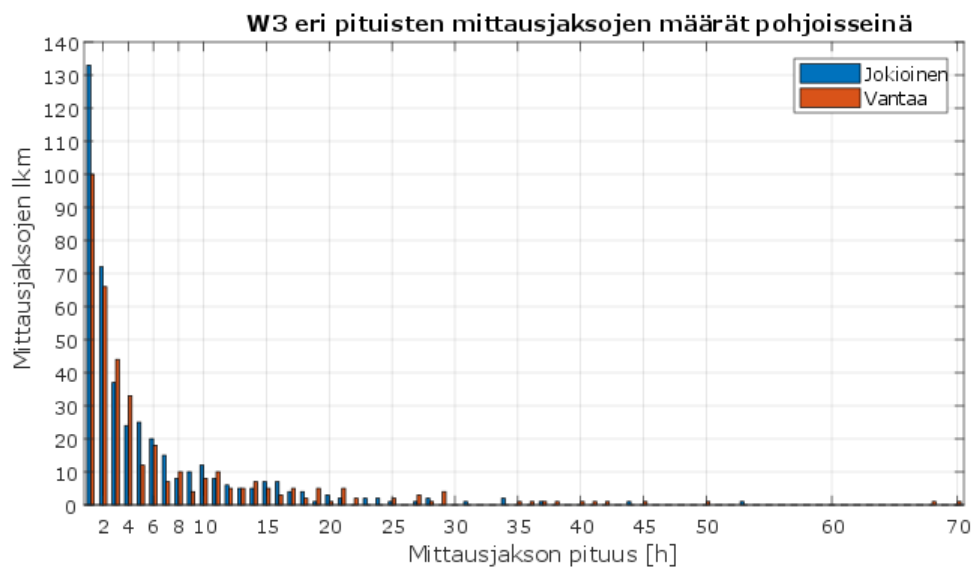
Kuva 5.29 Seinärakenteelle W3 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen laskettuna Jokioisten 2004 testivuodella pohjoisseinälle.



Kuva 5.30 Seinärakenteelle W3 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden si-
joittuminen laskettuna Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinälle.

Kuvista 5.29 ja 5.30 havaitaan, että kaikki mittauskelpoiset jaksot kesäaikaan ovat lyhyitä ja niitäkin esiintyy harvoin. Vuoden 2 000 ensimmäisenä ja 2 000 viimeisenä tuntina (noin tammi-maaliskuu ja loka-joulukuu) esiintyy selkeästi pidempiä mittausjaksoja ja mittausten onnistuminen on tällöin todennäköisempää. Myös mittauskelvottomia hetkiä on alku- ja loppuvuodesta vähemmän kuin muuna aikana vuodesta.

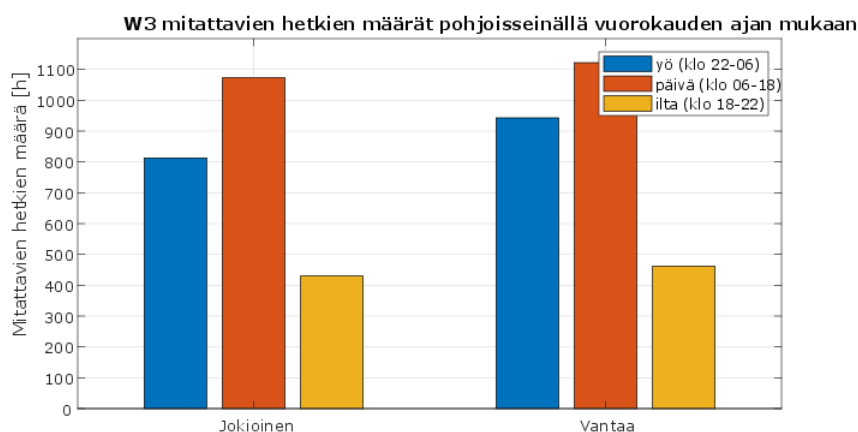
Kuvassa 5.31 esitetään seinärakenteelle W3 laskettujen eri pituisten mittauskelpoisten jaksosten lukumäärien jakaumaa.



Kuva 5.31 Seinärakenteelle W3 lasketut eri mittaiset mittausjaksot laskettuna Jo-
kioisten 2004 ja Vantaan 2007 testivuosilla pohjoisseinälle.

Kuvasta 5.31 havaitaan, että lyhyiden mittauskelpoisten jaksojen määrä on suuri. Korkeintaan 2 h mittaisten jaksojen määrä on 205 kpl yhteensä 422 jaksosta (Jokioinen 2004) ja 232 kpl yhteensä 378 jaksosta (Vantaa 2007). Näiden lyhyiden jaksojen osuus koko vuoden mittauskelpoisesta ajasta on 12 % (Jokioinen 2004) ja 9 % (Vantaa 2007). Vähintään 6 h mittaisten jaksojen määrät ovat 131 kpl (Jokioinen 2004) ja 122 kpl (Vantaa 2007). Nämä pitkät jaksot muodostavat 74 % (Jokioinen 2004) ja 75 % (Vantaa 2007) koko vuoden mittauskelpoisesta ajasta.

Alla olevassa kuvassa 5.32 esitetään mittauskelpoisten hetkien sijoittumista eri vuorokaudenaikoihin laskettuna seinärakenteelle W3.



Kuva 5.32 Seinärakenteen W3 mittauskelpoisten tuntien sijoittuminen vuorokaudenajan mukaan.

Kuvasta 5.32 nähdään, että Jokioisissa 2004 noin 1/3 mittauskelpoisista hetkistä sijoittuu yöaikaan (klo 22-06). Yöajaksi on määritetty 8 h eli 1/3 vuorokaudesta, joten yöaikaan osuvien mitattavien hetkien määrä ei ole suhteettoman suuri. Vantaalla 2007 yöaikaan osuvien mittauskelpoisten tuntien osuus on suurempi, lähes 40 %. Ilta-ajan tunnit eivät ole suoraan vertailukelpoisia yön ja päivän tunteihin, sillä ilta-aika on määritetty kestoltaan lyhyemmäksi kuin yö ja päivä.

Seinärakenteelle W3 mallinnuksista saadun lämpövirran perusteella laskettu näennäinen U-arvo on suuren osan vuodesta lähellä stationääritilassa laskettua vertailuarvoa (ks. liite 6). Talviaikaan näennäinen U-arvo vaikuttaa olevan hieman vertailuarvoa korkeampi, mikä johtuu todennäköisesti siitä, että vertailuarvo on laskettu kuivilla materiaaliominaisuuksilla.

Yhteenvedona rakenteelle W3 voidaan todeta, että mittaukset olisi parasta tehdä vuoden 2 000 ensimmäisen ja viimeisen tunnin aikana eli noin lokakuun ja maaliskuun välisenä aikana. Mittauskelpoisen ajan osuus koko vuodesta on noin 25-30 %. Mittauskelpoisista tunneista 9-12 % sijoittuu korkeintaan 2 h mittaisiin mittauskelpoisiin jaksoihin, mikä on

huomattavasti pienempi osuus kuin massiivitiiliseinällä W1. U-arvon laskennassa kannattaa käyttää ulkoilman keskilämpötilaa arviolta noin 9 h ajalta. Mittaukset kannattaa tehdä mieluiten seinältä, jolle kohdistuu vähän viistosadetta ja auringon paistetta. Tällä seinärakenteella ilmansuunnan vaikutus mitattavuuslukuihin ei kuitenkaan ole yhtä merkittävä kuin massiivitiiliseinillä W1 ja W6 ja seinärakenteella W5.

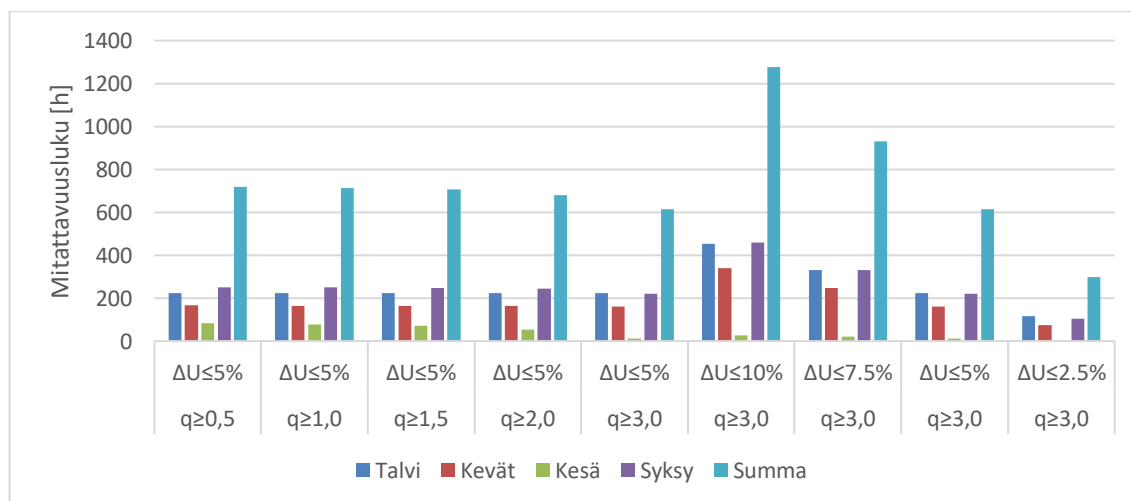
5.4.4 W4 Tiili-villa-tiiliseinä

Mitattavuuden kriteerien vaikutus

Taulukoissa 5.19 ja 5.20 sekä kuvissa 5.33 ja 5.34 on esitettyä mittauskelpoisten tuntien lukumäärät vaihtaen mitattavuuden kriteereistä erikseen lämpövirran minimivaatimusta ja sallittua poikkeamaa U-arvon vertailuarvosta.

Taulukko 5.19 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 testi-vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	q \geq 0,5 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 1,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 1,5 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 2,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 10\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 7.5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 5\%$	q \geq 3,0 $\Delta U \leq 2.5\%$
SUMMA	720	713	706	681	615	1277	931	615	299
OSUUS	8 %	8 %	8 %	8 %	7 %	15 %	11 %	7 %	3 %

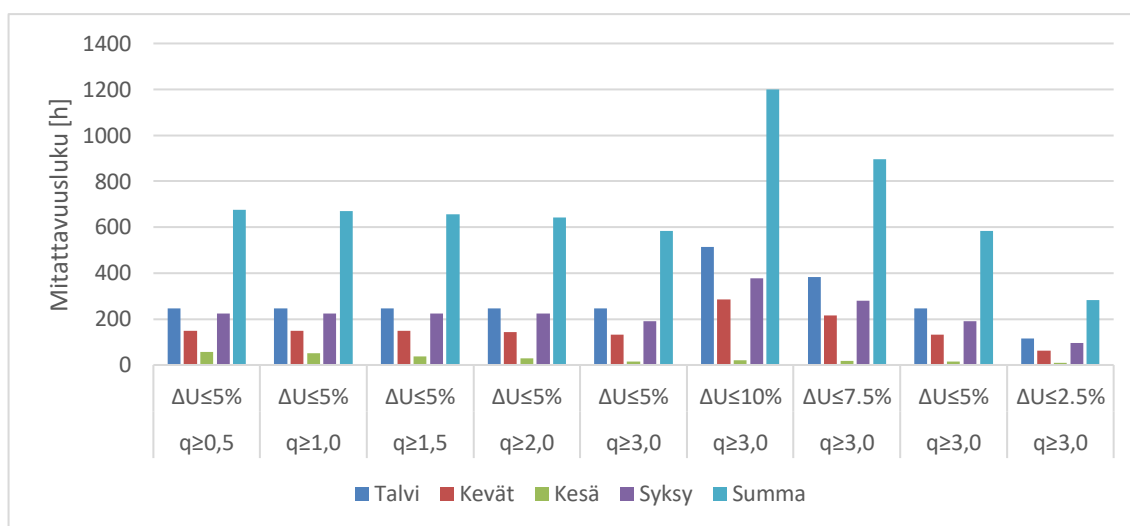


Kuva 5.33

Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuusluvut Jokioisten 2004 testi-vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoittain.

Taulukko 5.20 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	q _{≥0,5} ΔU≤5%	q _{≥1,0} ΔU≤5%	q _{≥1,5} ΔU≤5%	q _{≥2,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤10%	q _{≥3,0} ΔU≤7.5%	q _{≥3,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤2.5%
SUMMA	677	671	655	641	583	1199	897	583	284
OSUUS	8 %	8 %	7 %	7 %	7 %	14 %	10 %	7 %	3 %



Kuva 5.34 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoin.

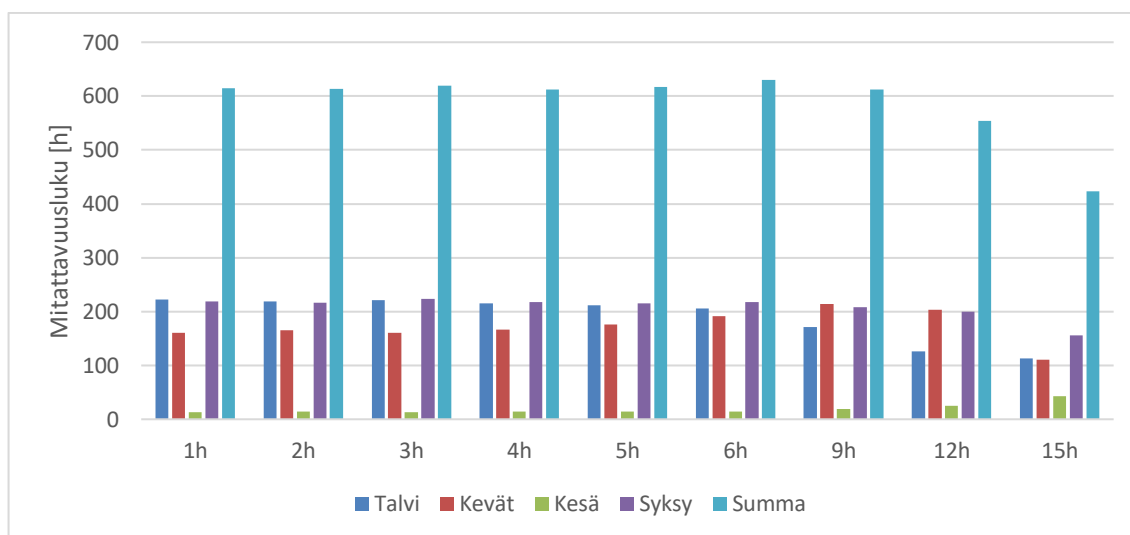
Taulukoista 5.19 ja 5.20 sekä kuvista 5.33 ja 5.34 voidaan päätellä, että mittauskelpoisten hetkien määrää rakenteella W4 rajoittaa eniten U-arvon tarkkuusvaatimus. Mikäli U-arvon sallittua poikkeamaa vertailuarvosta kasvatettaisiin 5,0 %:sta 7,5 %:iin, mittauskelpoisten tuntien määrä kasvaisi Jokioisten 2004 testivuoden ilmastossa noin 51 % ja Vantaan 2007 testivuoden ilmastossa noin 54 %. Sallitun poikkeaman kasvattaminen 10 %:iin noin 2-kertaistaisi mittauskelpoisten tuntien määrän verrattuna tilanteeseen, jossa sallittu poikkeama on 5,0 %. Seinärakenne W4 on melko hyvin lämpöä eristävä ($U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$), joten lämpövirran tiheyden minimirajoituksen laskeminen arvosta $3,0 \text{ W/m}^2$ esimerkiksi arvoon $2,0 \text{ W/m}^2$ lisäisi mittauskelpoisten tuntien määrää noin 10-11 %.

Ulkoilman keskilämpötilan käytön vaikutus

Taulukoissa 5.21 ja 5.22 sekä kuvissa 5.35 ja 5.36 esitetään, miten ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen näennäisen U-arvon laskennassa hetkellisen ulkolämpötilan sijaan mitatun lämpövirran lisäksi vaikuttaa mittauskelpoisten tuntien määrään vuodenaika- ja vuositasolla.

Taulukko 5.21 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

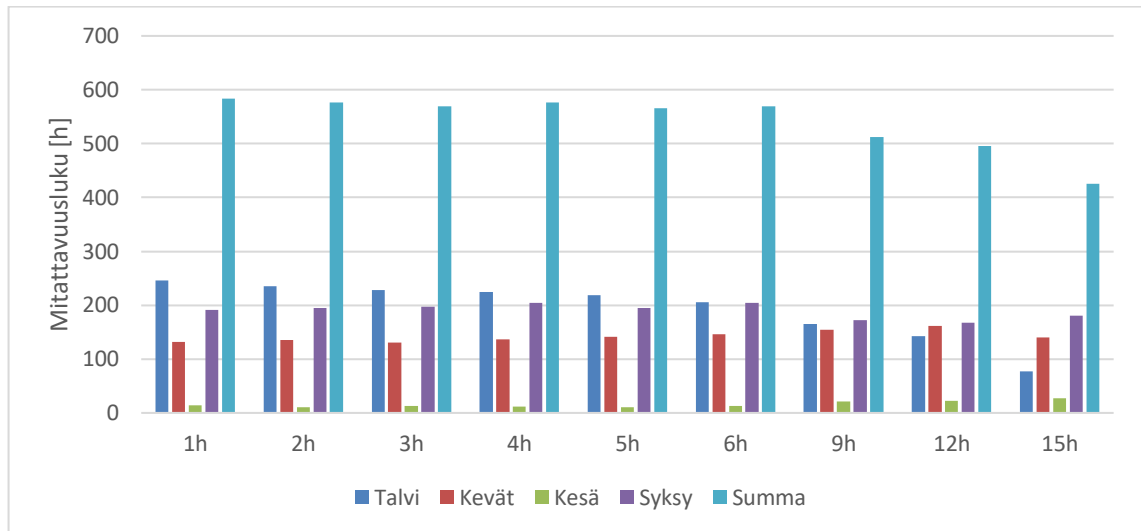
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	615	614	619	612	617	630	612	554	423
OSUUS	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	6 %	4 %



Kuva 5.35 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoittain.

Taulukko 5.22 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	583	576	569	577	566	569	512	495	425
OSUUS	7 %	7 %	6 %	7 %	6 %	6 %	6 %	6 %	5 %



Kuva 5.36 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoin.

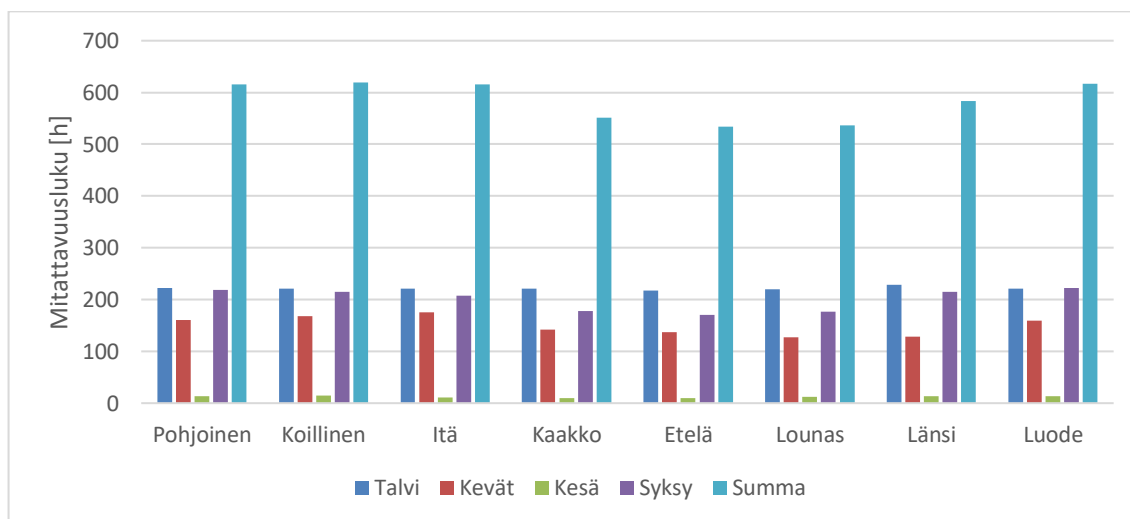
Kuvien 5.35 ja 5.36 sekä taulukoiden 5.21 ja 5.22 perusteella ulkoilman keskiarvon käyttäminen näennäisen U-arvon laskennassa ei kasvata mittauskelpoisten tuntien kokonaismäärää vuositasona. Mitattavuusluku laskee Vantaan 2007 ilmastossa ulkoilman keskilämpötilaa käyttämällä verrattuna hetkellisen ulkoilman lämpötilan käyttämiseen näennäisen U-arvon laskennassa. Jokioisten 2004 ilmastossa havaitaan hyvin pieni kasvu mitattavuusluvussa käytettäessä 6 h ajalta laskettua keskiarvoa, kasvu on noin 2 %.

Ilmansuunnan vaikutus

Taulukoissa 5.23 ja 5.24 sekä kuvissa 5.37 ja 5.38 esitetään ilmansuunnan ja vuodenajan vaikutuksia mitattavuuslukuihin.

Taulukko 5.23 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

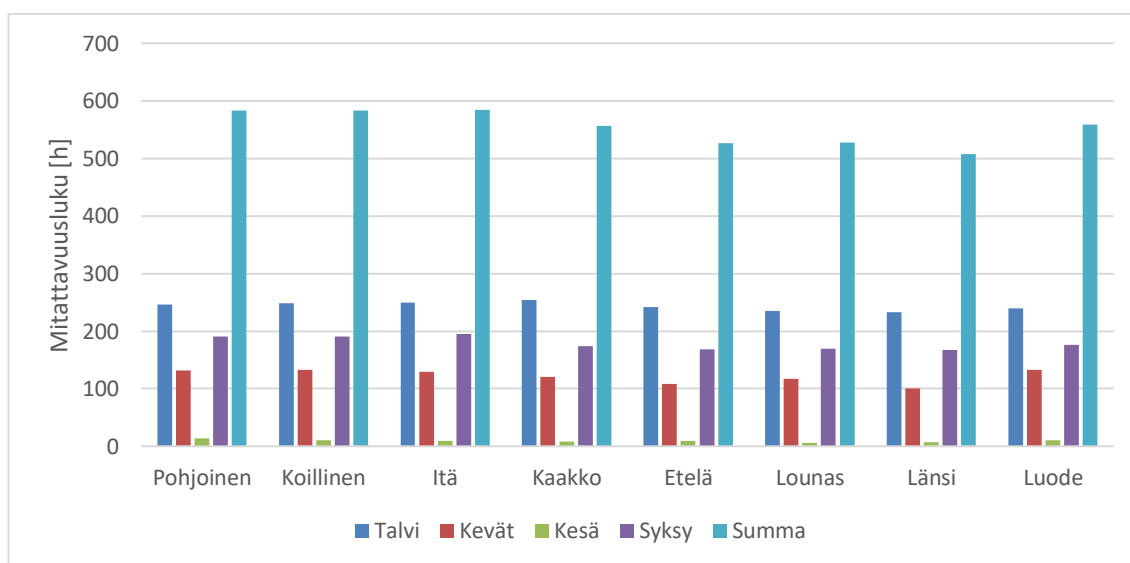
	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	51	50	51	49	49	51	52	51	7 %
Helmi	61	61	60	61	57	58	64	60	9 %
Maalis	71	73	74	63	52	54	55	68	9 %
Huhti	47	48	59	47	49	41	40	52	7 %
Touko	43	47	43	32	36	32	33	39	5 %
Kesä	8	8	8	9	8	8	8	9	1 %
Heinä	0	0	0	0	0	0	0	0	0 %
Elo	5	7	3	1	2	4	5	5	1 %
Syys	37	39	35	33	31	30	39	40	5 %
Loka	86	84	81	69	62	65	82	88	10 %
Marras	96	92	91	76	77	82	94	95	12 %
Joulu	110	110	110	111	111	111	112	110	15 %
SUMMA	615	619	615	551	534	536	584	617	584
OSUUS	7 %	7 %	7 %	6 %	6 %	6 %	7 %	7 %	7 %



Kuva 5.37 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoin.

Taulukko 5.24 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	113	115	115	113	113	112	115	109	15 %
Helmi	81	80	73	68	56	59	67	81	11 %
Maalis	49	52	49	43	41	44	37	51	6 %
Huhti	60	55	59	52	52	54	45	59	8 %
Touko	23	26	22	26	15	19	19	23	3 %
Kesä	0	0	0	1	1	0	0	0	0 %
Heinä	0	0	0	0	0	0	0	0	0 %
Elo	14	11	9	7	8	6	7	11	1 %
Syys	50	50	45	35	28	30	32	34	5 %
Loka	76	75	81	75	71	71	70	76	10 %
Marras	65	66	69	64	69	69	65	66	9 %
Joulu	52	53	62	73	73	64	51	49	8 %
SUMMA	583	583	584	557	527	528	508	559	554
OSUUS	7 %	7 %	7 %	6 %	6 %	6 %	6 %	6 %	6 %



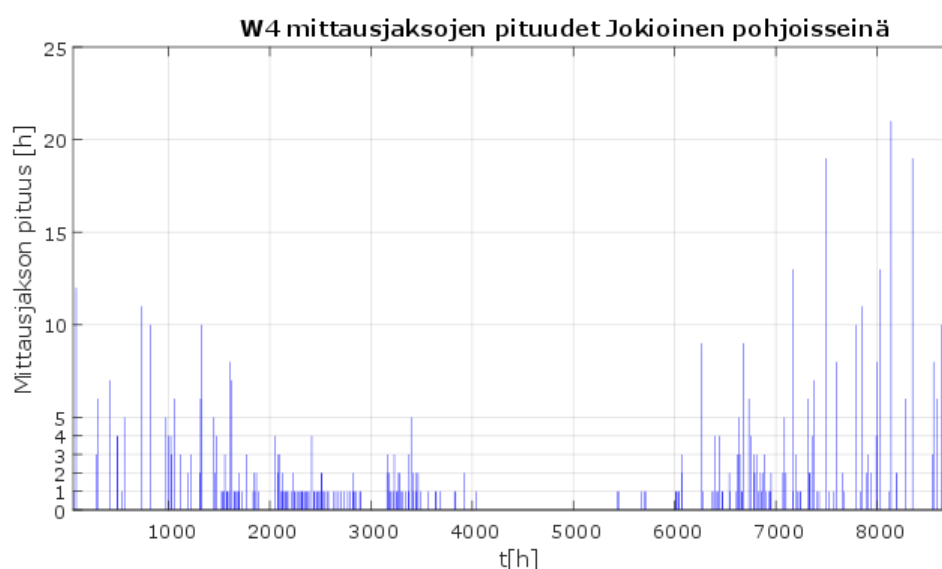
Kuva 5.38 Seinärakenteelle W4 lasketut mitattavuushuvut Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.

Jokioisten 2004 testivuoden olosuhteissa (ks. taulukko 5.23 ja kuva 5.37) eniten mittauskelpoisia tunteja on luode-itä -välillä ja Vantaan 2007 testivuoden olosuhteissa (ks. taulukko 5.24 ja kuva 5.38) luode-kaakko -välillä. Ilmansuunnan vaikutus mittauskelpoisten tuntien määrään on havaittavissa ympäri vuoden. Parhaan ilmansuunnan mittauskelpoisten tuntien määrä on noin 15 % korkeampi verrattuna huonoimpaan suuntaan. Yksittäisten kuukausien kohdalla erot mittauskelpoisten tuntien määrissä eri ilmansuuntiin suunnatuilla seinillä voivat olla selvästi suurempia. Vähiten mittauskelpoisia tunteja on etelän

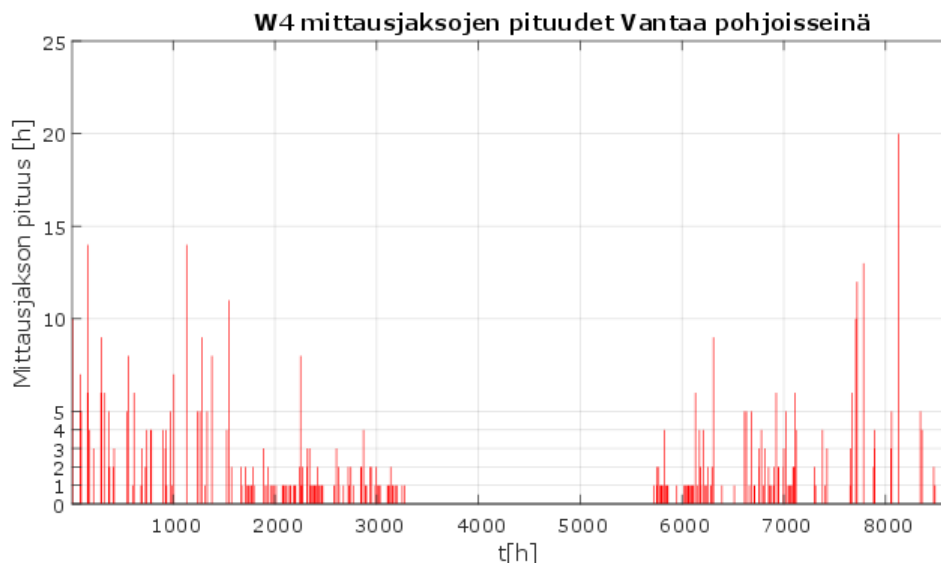
ja lännen välillä, jonne kohdistuu eniten viistosadetta ja auringon suoraa säteilyä. Huonoin ilmansuunta ei selkeästi riipu yksinomaan viistosateen pääasiallisesta tulosuunnasta, sillä matalimmat mitattavuusluvut eivät sijoitu viistosateen maksimien suuntiin. Kuitenkin matalimmat mitattavuusluvut on saatu seinille, joille viistosadetta kohdistuu paljon. Eniten mittauskelpoisia tunteja on loka-helmikuussa ja selkeästi vähiten kesä-elokuussa. Touko-syyskuussa mittauskelpoista aikaa on korkeintaan 5 %.

Mittauskelpoisten jaksojen pituudet ja sijoittuminen

Kuvissa 5.39 ja 5.40 tarkastellaan mittauskelpoisten jaksojen sijoittumista ja pituutta vuodenajan mukaan. Mittausjaksojen pituudet on laskettu käyttäen sallittuna näennäisen U-arvon poikkeamana vertailuarvosta $\pm 5\%$.



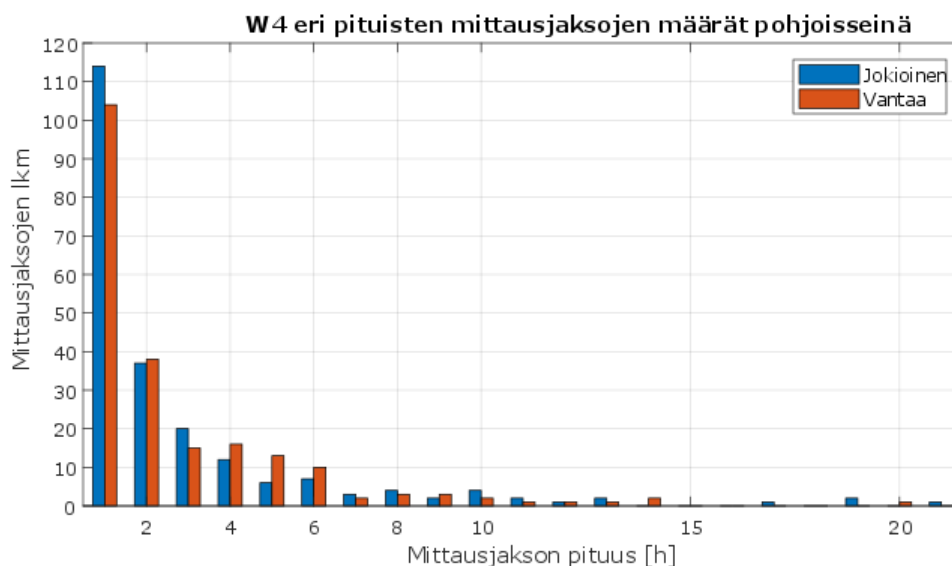
Kuva 5.39 *Seinärakenteelle W4 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen laskettuna Jokioisten 2004 testivuodella pohjoisseinälle.*



Kuva 5.40 Seinärakenteelle W4 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen laskettuna Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinälle.

Kuvista 5.39 ja 5.40 nähdään, että kesäaikaan on pitkiä aikoja, jolloin mittauskelpoisia hetkiä ei ole lainkaan. Pidempiä mittausjaksoja on pääasiassa vuoden 1 500 ensimmäisen ja 2 000 viimeisen tunnin aikana eli noin loka-helmikuussa.

Kuvassa 5.41 esitetään seinärakenteelle W4 laskettujen eri pituisten mittauskelpoisten jaksojen lukumäärien jakaumaa.

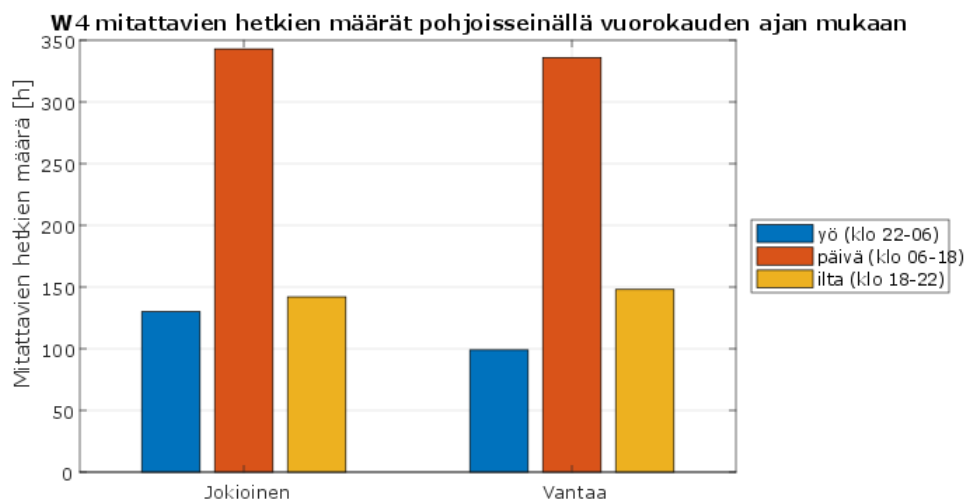


Kuva 5.41 Seinärakenteelle W4 lasketut eri mittaiset mittausjaksot Jokioisten 2004 ja Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä.

Kuvasta 5.41 nähdään, että lyhyiden mittausjaksojen määrä on suuri rakenteella W4. Korkeintaan 2 h mittaisia mittauskelpoisia jaksoja on Jokioisten 2004 ilmastossa 151 kpl yhteensä 218 jaksosta ja nämä muodostavat mittauskelpoisesta ajasta 31 %. Vantaalla 2007

korkeintaan 2 h mittaisia mittauskelpoisia jaksoja on 142 kpl ja nämä muodostavat mittauskelpoisesta ajasta samoin 31 %. Vähintään 6 h mittaiset mittausjaksot käsittävät mittauskelpoisesta ajasta 47 % (Jokioinen 2004) ja 39 % (Vantaa 2007).

Alla olevassa kuvassa 5.42 esitetään mittauskelpoisten hetkien sijoittumista eri vuorokaudenaikoihin laskettuna seinärakenteelle W4.



Kuva 5.42 Seinärakenteen W4 mittauskelpoisten tuntien sijoittuminen vuorokaudenajan mukaan.

Kuvasta 5.42 nähdään, että yöaikaan sijoittuu pieni osa mittauskelpoisista tunneista, ainoastaan 17-21 %. Tämä tulos poikkeaa muista tässä työssä tarkasteltavista seinärakenteista, joilla yöaikaan sijoittuvan mittausajan osuus on noin 30-40 %. Ilta-ajan tunnit eivät ole suoraan vertailukelpoisia yön ja päivän tunteihin, sillä ilta-aika on määritetty kestoltaan lyhyemmäksi kuin yö ja päivä.

Seinärakenteelle W4 mallinnuksista saadun lämpövirran perusteella laskettu näennäinen U-arvo on suuren osan vuodesta pienempi kuin stationääritilassa laskettu vertailuarvo (ks. Liite 6). Kesällä näennäisen U-arvon ja referenssiarvona toimivan stationääritilan arvon välinen ero kasvaa. Tämä viittaa samaan, mitä Lindberg *et al.* havaitsivat rakennetta W4 vastaavalle rakenteelle koerakennuksen avulla tekemässään tutkimuksessa (Lindberg *et al.* 2012). He havaitsivat, että raskas ulkokuori eristekerroksen ulkopuolella vähentää seinärakenteen läpi siirtyvän lämpöenergian määrää, koska auringon säteilyenergiaa sitoutuu ulkokuoreen pitkäksi aikaa. Lindberg *et al.* mukaan standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan laskettu U-arvo yliarvioi tästä syystä energiankulutusta kyseisellä rakenteella suurimman osan vuodesta.

Yhteenvetona seinärakenne W4 on U-arvon mittausten kannalta tässä työssä tarkastelluista rakenteista haastavin, sillä sen mitattavuusluvut ovat selvästi kaikkein matalimpia. Vuodesta on mittauskelpoista aikaa pohjoiseen suunnatulla seinällä vain noin 7 % ja tästä

ajasta 31 % on korkeintaan 2 h pituisia mittausjaksoja. Mittaukset tulisi suorittaa vuoden 1 500 ensimmäisen ja 2 000 viimeisen tunnin aikana eli noin loka-helmikuussa. Ilmansuunta vaikuttaa selkeästi mitattavuuslukuun ja mittaukset tulisi suorittaa mielellään seinältä, johon ei kohdistu paljoa viistosadetta tai suoraan auringon paistetta. Mitattavuutta rakenteella W4 rajoittaa pääasiassa näennäisten U-arvojen merkittävä poikkeaminen vertailuarvosta, mutta lämpövirran minimivaatimuksen laskemisella olisi myös mitattavuuslukuja kasvattava vaikutus. Ulkoilman keskilämpötilan käytöllä ei havaittu olevan mitattavuuslukuja kasvattavaa vaikutusta.

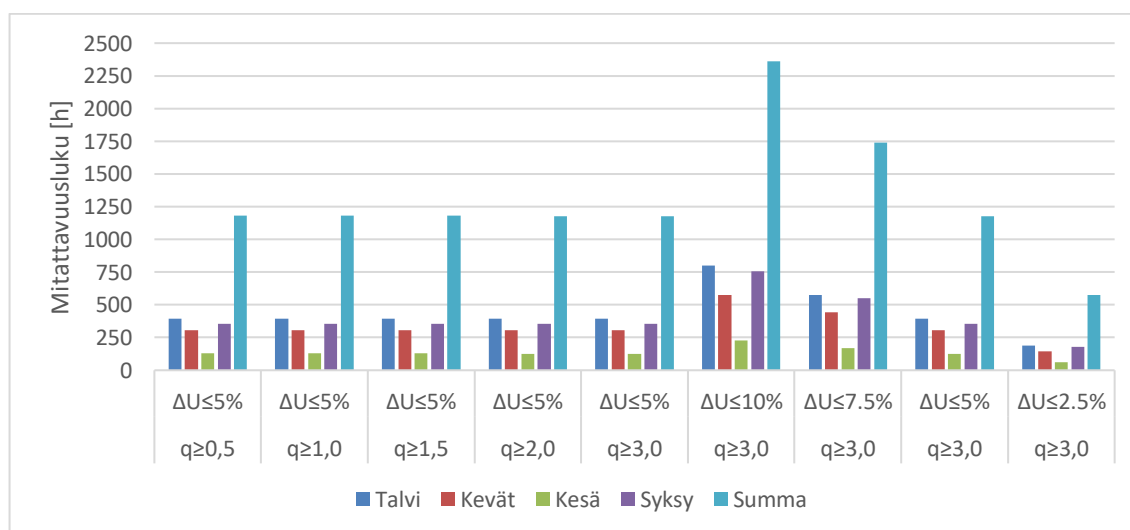
5.4.5 W5 Eristämätön kuorimuuriseinä

Mitattavuuden kriteerien vaikutus

Taulukoissa 5.25 ja 5.26 sekä kuvissa 5.43 ja 5.44 on esitettyä mittauskelpoisten tuntien lukumäärät vaihtaen mitattavuuden kriteereistä erikseen lämpövirran minimivaatimusta ja sallittua poikkeamaa U-arvon vertailuarvosta.

Taulukko 5.25 Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuushuvut Jokioisten 2004 testi-vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	$q \geq 0,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 2,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 10\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 7.5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 2.5\%$
SUMMA	1182	1182	1182	1179	1176	2361	1741	1176	576
OSUUS	13 %	13 %	13 %	13 %	13 %	27 %	20 %	13 %	7 %

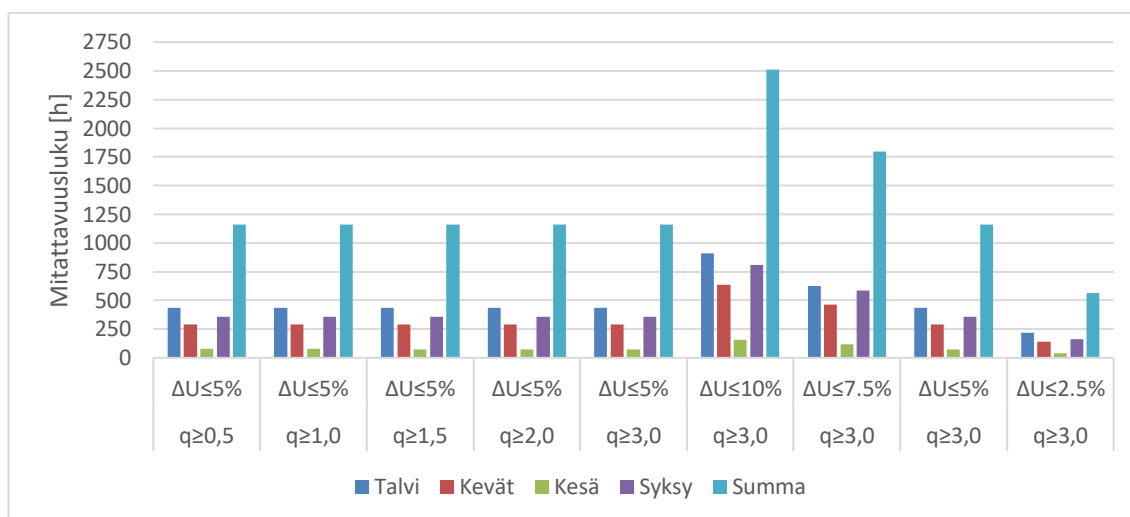


Kuva 5.43

Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuushuvut Jokioisten 2004 testi-vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenajoin.

Taulukko 5.26 Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuusluvut Vantaan testivuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	q _{≥0,5} ΔU≤5%	q _{≥1,0} ΔU≤5%	q _{≥1,5} ΔU≤5%	q _{≥2,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤10%	q _{≥3,0} ΔU≤7.5%	q _{≥3,0} ΔU≤5%	q _{≥3,0} ΔU≤2.5%
SUMMA	1163	1162	1160	1160	1160	2510	1794	1160	565
OSUUS	13 %	13 %	13 %	13 %	13 %	29 %	20 %	13 %	7 %

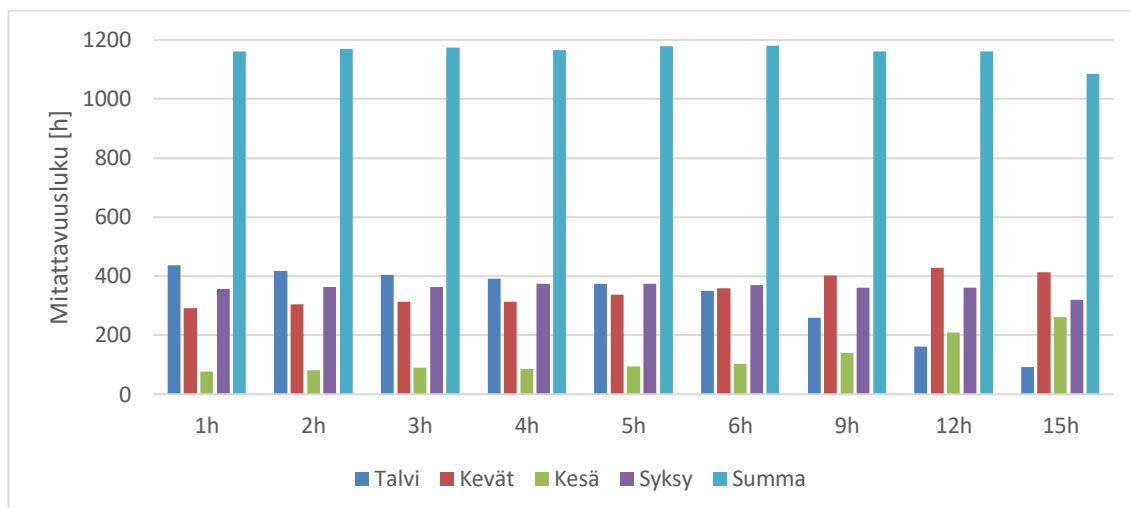


Kuva 5.44 Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenaikojittain.

Taulukoista 5.25 ja 5.26 sekä kuvista 5.43 ja 5.44 nähdään, että seinärakenteen W5 tapauksessa mittauskelpoisten tuntien määrää rajoittaa selkeästi näennäisen U-arvon tarkkuusvaatimus. Tämä oli oletettavaa rakenteen ollessa heikosti lämpöä eristävä ($U = 1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$), joten lämpövirta on pääosin suuri, eikä tästä johtuen lämpövirran tiheyden pieni arvo rajoita mittauksia. Mikäli U-arvon sallittua virhettä kasvatettaisiin 5,0 %:sta 7,5 %:iin, mittauskelpoisten tuntien määrä kasvaisi noin 48 % (Jokioinen 2004) ja noin 55 % (Vantaa 2007), mikä olisi merkittävän suuruinen kasvu.

Ulkoilman keskilämpötilan käytön vaikutus

Taulukoissa 5.27 ja 5.28 sekä kuvissa 5.45 ja 5.46 esitetään, miten ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen näennäisen U-arvon laskennassa hetkellisen ulkolämpötilan sijaan mitatun lämpövirran lisäksi vaikuttaa mittauskelpoisten tuntien määrään vuodenaika- ja vuositasolla.



Kuva 5.46 Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuushuvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoin.

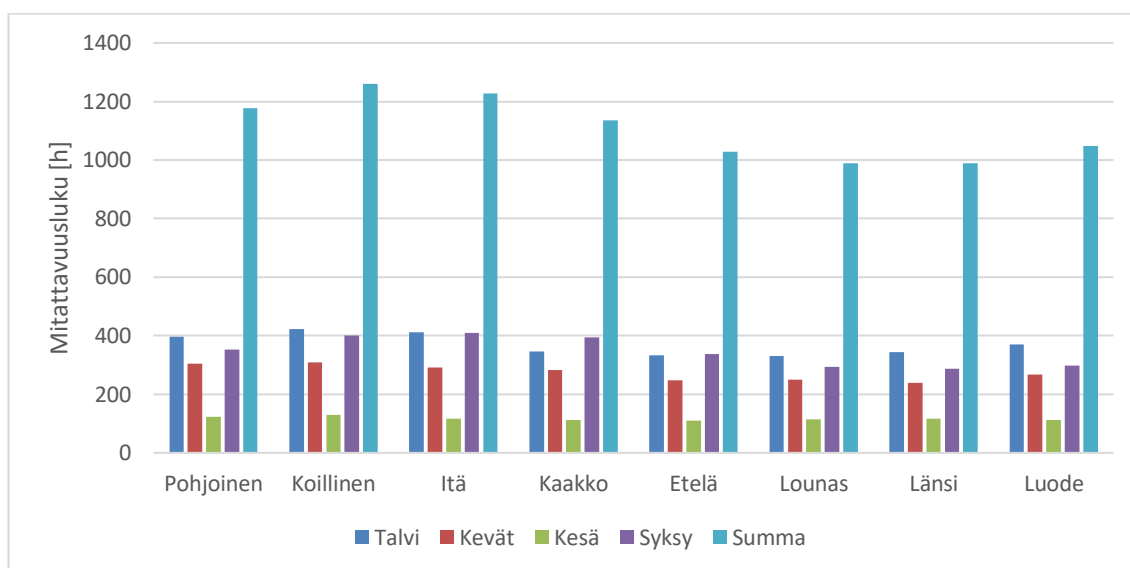
Taulukoiden 5.27 ja 5.28 sekä kuvien 5.45 ja 5.46 perusteella näyttää siltä, että rakenteen W5 tapauksessa mittauskelpoisten tuntien määrä ei kasva Vantaan 2007 eikä Jokioisten 2004 ilmastossa merkittävästi käyttämällä U-arvon määrittämisessä ulkoilman lämpötilan keskiarvoa. Vantaalla 2007 mitattavuusluku kasvaa noin 2 % käytettäessä 6 h ajalta laskettua ulkoilman keskilämpötilaa, Jokioisissa 2004 ei lainkaan.

Ilmansuunnan vaikutus

Taulukoissa 5.29 ja 5.30 sekä kuvissa 5.47 ja 5.48 esitetään ilmansuunnan ja vuodenaajan vaikutuksia mitattavuuslukuun.

Taulukko 5.29 Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuushuvut eri ilmansuuntiin Jokioisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

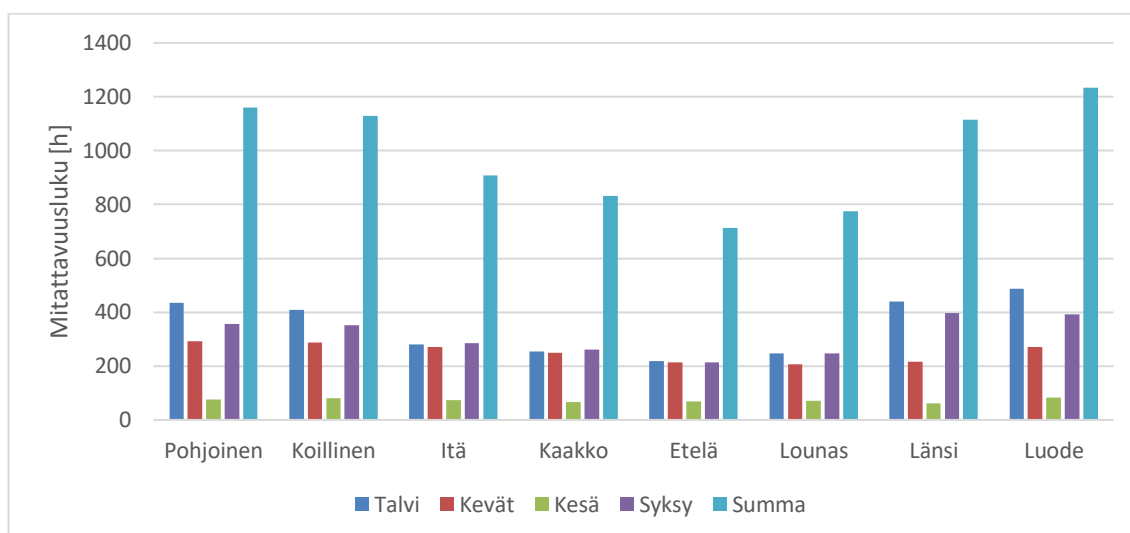
	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	144	151	149	129	127	125	121	139	18 %
Helmi	134	141	133	108	127	132	141	126	19 %
Maalis	140	150	153	137	131	134	129	144	19 %
Huhti	94	87	68	71	48	46	43	58	9 %
Touko	70	71	70	74	68	71	68	65	9 %
Kesä	52	57	52	50	50	53	52	48	7 %
Heinä	44	40	34	36	32	39	42	43	5 %
Elo	27	33	30	26	29	22	23	21	4 %
Syys	107	111	119	108	97	87	87	88	14 %
Loka	150	169	167	150	126	113	131	129	19 %
Marras	96	120	123	137	115	93	70	82	15 %
Joulu	118	131	129	109	79	73	83	105	14 %
SUMMA	1176	1261	1227	1135	1029	988	990	1048	1107
OSUUS	13 %	14 %	14 %	13 %	12 %	11 %	11 %	12 %	14



Kuva 5.47 Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.

Taulukko 5.30 Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	189	185	148	115	76	86	172	212	20 %
Helmi	123	117	102	130	136	136	134	122	19 %
Maalis	120	113	102	98	85	82	91	121	14 %
Huhti	105	106	102	95	74	74	68	83	12 %
Touko	67	69	66	57	54	51	58	67	8 %
Kesä	28	28	30	28	25	28	17	34	4 %
Heinä	25	30	23	21	20	22	21	25	3 %
Elo	23	22	20	17	23	21	24	23	3 %
Syys	82	87	74	78	64	70	83	74	11 %
Loka	135	134	131	116	96	97	121	132	16 %
Marras	139	130	79	67	54	81	192	187	16 %
Joulu	124	107	31	9	7	26	134	154	10 %
SUMMA	1160	1128	908	831	714	774	1115	1234	983
OSUUS	13 %	13 %	10 %	9 %	8 %	9 %	13 %	14 %	10

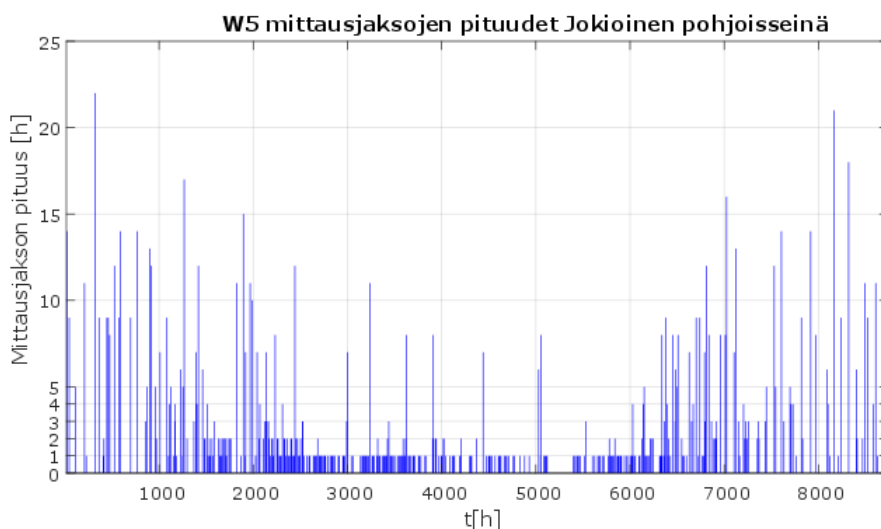


Kuva 5.48 *Seinärakenteelle W5 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoittain.*

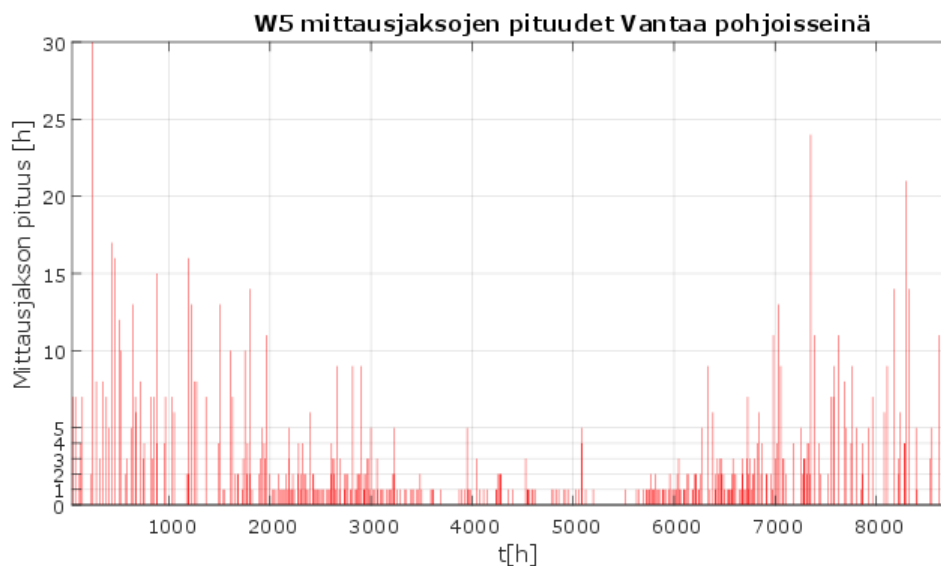
Taulukoista 5.29 ja 5.30 sekä kuvista 5.47 ja 5.48 havaitaan, että seinän suuntaus vaikuttaa merkittävästi rakenteen W5 U-arvon mittaamiseen. Matalin mitattavuusluku on kummankin ilmaston mallinnusten mukaan suunnassa, johon kohdistuu eniten viistosadetta. Parhaan ilmansuunnan mitattavuusluku on noin 28 % (Jokioinen 2004) ja 73 % (Vantaa 2007) korkeampi verrattuna huonoimpaan ilmansuuntaan. Vantaalla 2007 ilmansuunnan merkitys korostuu, mikä johtunee suuremmasta viistosademäärästä verrattuna Jokioisten 2004 testivuoteen.

Mittauskelpoisten jaksojen pituudet ja sijoittuminen

Kuvissa 5.49 ja 5.50 tarkastellaan mittausjaksojen sijoittumista sekä pituutta vuodenajan mukaan. Mittausjaksojen pituudet on laskettu käyttäen sallittuna näennäisen U-arvon poikkeamana vertailuarvosta $\pm 5 \%$.



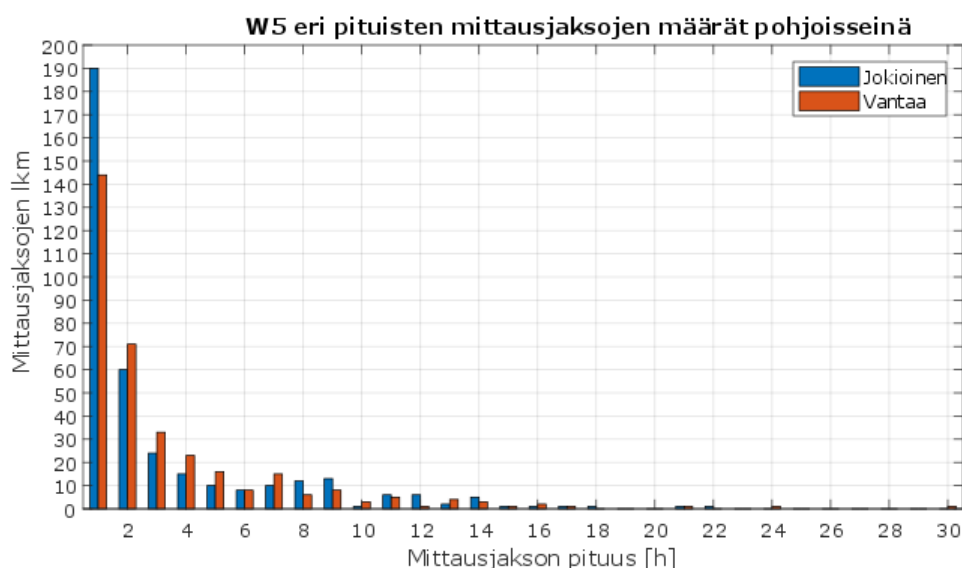
Kuva 5.49 *Seinärakenteelle W5 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen laskettuna Jokioisten 2004 testivuodella pohjoisseinälle, ei ulkoilman lämpötilan keskiarvoa.*



Kuva 5.50 *Seinärakenteelle W5 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen laskettuna Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinälle.*

Kuvista 5.49 ja 5.50 huomataan, että pitkät mittauskelpoiset jaksot ovat sijoittuneet pääasiassa vuoden 2 500 ensimmäisen ja 2 000 viimeisen tunnin ajalle eli noin lokakuun puolivälin ja huhtikuun puolivälin välisenä aikana.

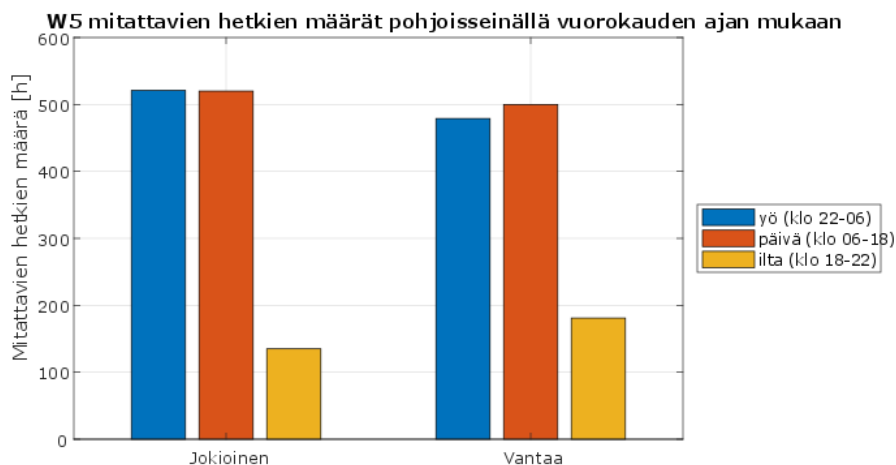
Kuvassa 5.51 esitetään seinärakenteelle W5 laskettujen eri pituisten mittauskelpoisten jaksojen lukumäärien jakaumaa.



Kuva 5.51 Seinärakenteelle W5 lasketut eri mittaiset mittausjaksot Jokioisten 2004 ja Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä.

Kuvan 5.51 perusteella huomataan, että Jokioisten 2004 testivuoden sääolosuhteissa tehdyissä mallinuksissa esiintyy pidempiä mittauskelpoisia jaksoja kuin Vantaan 2007 testivuodella tehdyissä mallinuksissa. Korkeintaan 2 h mittaisia mittauskelpoisia jaksoja on 250 yhteensä 368 jaksosta eli 68 % (Jokioinen 2004) ja 215 yhteensä 347 jaksosta eli 62 % (Vantaa 2007). Nämä muodostavat mittauskelpoisesta kokonaisajasta 26 % (Jokioinen 2004) ja 25 % (Vantaa 2007). Vähintään 6 h mittaisia jaksoja on 69 (Jokioinen 2004) ja 60 (Vantaa 2007) ja nämä muodostavat mittauskelpoisesta ajasta 58 % (Jokioinen 2004) ja 52 % (Vantaa 2007). Näiden lukujen perusteella voidaan todeta testivuosien sääolosuhteiden olevan suurin piirtein yhtä hyviä mittauksia ajatellen pohjoisseinää tarkasteltaessa. Kuten edellä nähtiin (kuvat 5.47 ja 5.48), viistosateelle alttiilla seinällä Vantaan 2007 ilmastossa mitattavuusluvut ovat Jokioisia 2004 matalampia.

Alla olevassa kuvassa 5.52 esitetään mittauskelpoisten hetkien sijoittumista eri vuorokaudenaikoihin laskettuna seinärakenteelle W4.



Kuva 5.52 Seinärakenteen W5 mittauskelpoisten tuntien sijoittuminen vuorokaudenajan mukaan.

Mittauskelpoisista tunneista yli 40 % sijoittuu kuvan 5.52 mukaisesti yöaikaan, mikä on enemmän kuin yöajan osuus koko vuorokaudesta. Mittausten tekoa ajatellen yöaika on siis parempaa kuin päivä. Ilta-ajan tunnit eivät ole suoraan vertailukelpoisia yön ja päivän tunteihin, sillä ilta-aika on määritetty kestoltaan lyhyemmäksi kuin yö ja päivä.

Seinärakenteelle W5 mallinnuksista saadun lämpövirran perusteella laskettu näennäinen U-arvo on suuren osan kylmästä vuodenajasta korkeampi kuin stationääritilassa laskettu vertailuarvo (ks. liite 6). Syy tälle on todennäköisesti materiaalien kosteuspiitoisuus, jota SFS-EN ISO 6946:2017 mukaisissa laskelmissa ei oteta huomioon. Kesäaikaan näennäinen U-arvo on lähempänä vertailuarvoa.

Yhteenvetona rakenteesta W5 voidaan todeta, että se on U-arvon mittaamisen kannalta melko haastava rakenne. Mittauskelpoisia hetkiä on ilmansuunnasta riippuen 10-15 % vuodesta ja mittausajasta noin 25 % sijoittuu korkeintaan 2 h mittaisiin jaksoihin. Seinän suuntauksella on erittäin merkittävä vaikutus mitattavuuslukuihin, erityisesti sateisessa ilmastossa. Mittauskelpoisten tuntien määrää rajoittaa U-arvon tarkkuusvaatimus eikä lämpövirran tiheyden pieni arvo. Ulkoilman lämpötilan keskiarvon käyttäminen ei kasvata mitattavuuslukuja merkittävästi rakenteella W5.

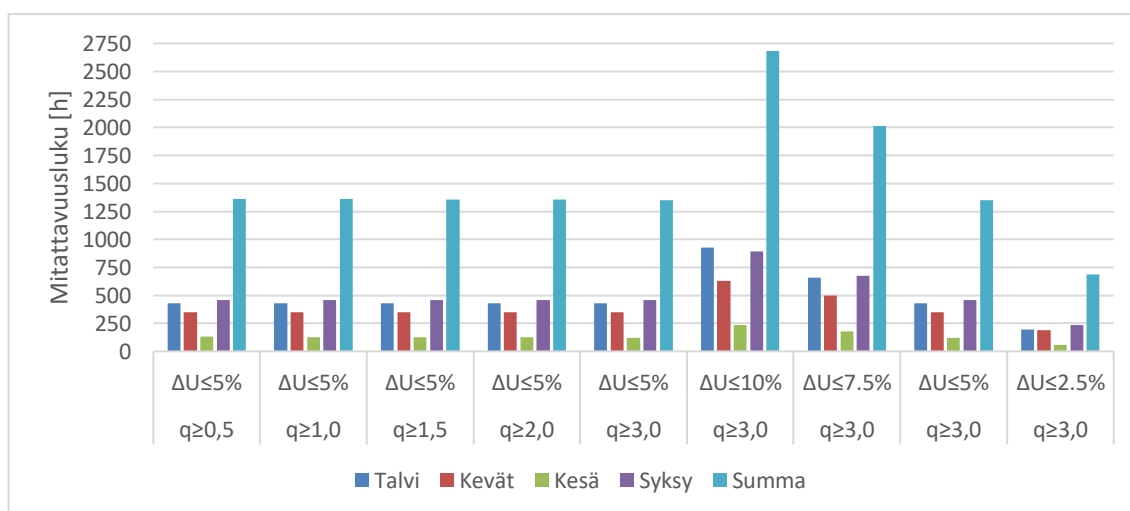
5.4.6 W6 Massiivitiiliseinä reikätiilistä

Mitattavuuden kriteerien vaikutus

Taulukoissa 5.31 ja 5.32 sekä kuvissa 5.53 ja 5.54 on esitettyä mittauskelpoisten tuntien lukumäärät vaihtaen mitattavuuden kriteereistä erikseen lämpövirran minimivaatimusta ja sallittua poikkeamaa U-arvon vertailuarvosta.

Taulukko 5.31 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuushuvut Jokioisten 2004 testi-
vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

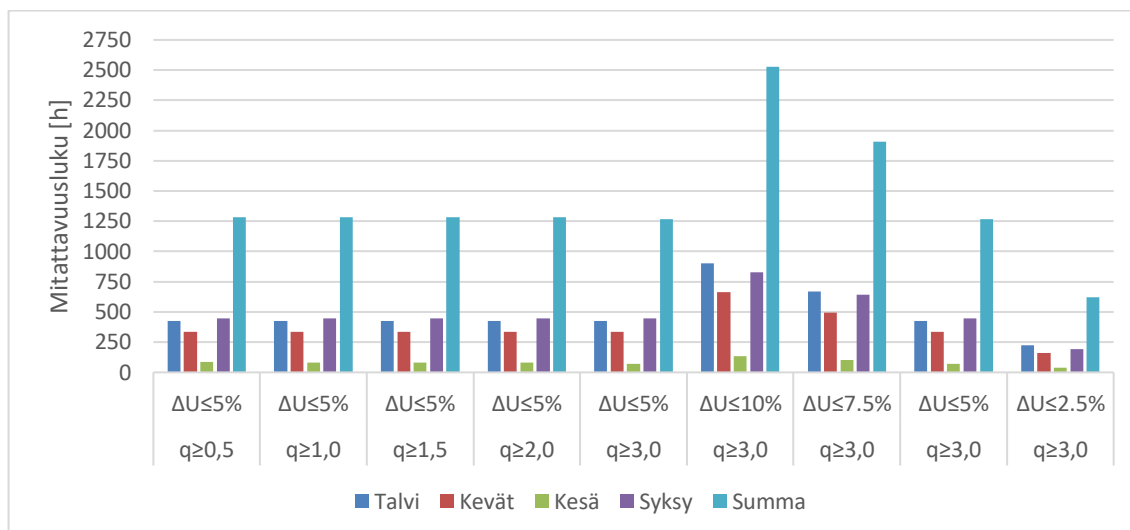
	$q \geq 0,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 2,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 10\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 7.5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 2.5\%$
SUMMA	1360	1359	1358	1358	1352	2685	2011	1352	685
OSUUS	16 %	16 %	16 %	16 %	15 %	31 %	23 %	15 %	8 %



Kuva 5.53 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuushuvut Jokioisten 2004 testi-
vuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus
vuodenajoittain.

Taulukko 5.32 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuushuvut Vantaan 2007 testivuo-
della pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus.

	$q \geq 0,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 1,5$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 2,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 10\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 7.5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 5\%$	$q \geq 3,0$ $\Delta U \leq 2.5\%$
SUMMA	1284	1283	1283	1283	1270	2528	1907	1270	620
OSUUS	15 %	15 %	15 %	15 %	14 %	29 %	22 %	14 %	8 %



Kuva 5.54 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinällä vuosittain, mitattavuuden kriteerien vaikutus vuodenaikojen mukaan.

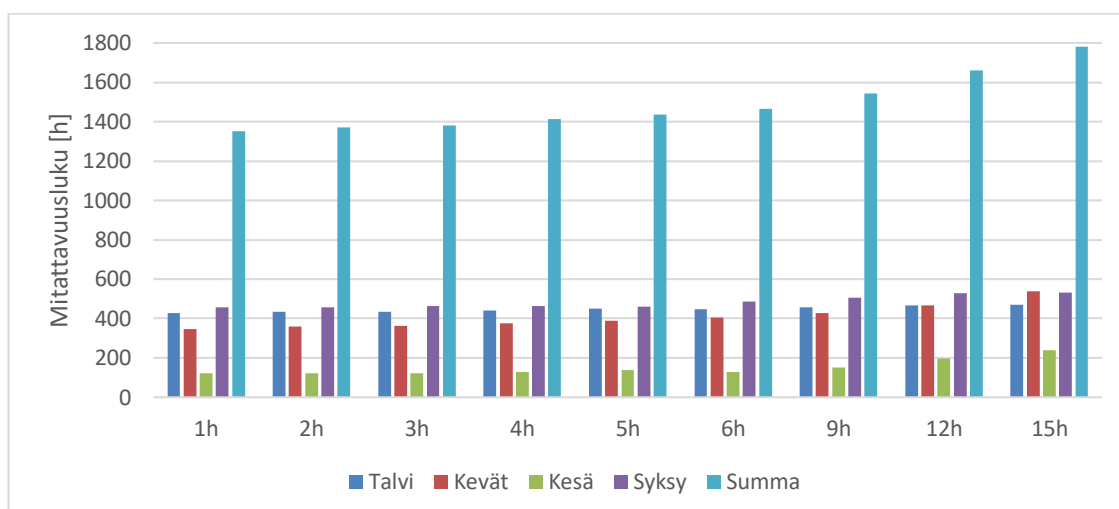
Taulukoista 5.31 ja 5.32 sekä kuvista 5.53 ja 5.54 nähdään, että seinärakenteen W6 tapauksessa mittauskelpoisten tuntien määrää rajoittaa selkeästi U-arvon tarkkuusvaatimus. Tämä oli oletettavaa, sillä rakenne on heikosti lämpöä eristävä ($U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$), joten lämpövirta on pääosin suuri, eikä tästä johtuen lämpövirran tiheyden pieni arvo rajoita mittauksia. Mikäli U-arvon sallittua virhettä kasvatettaisiin 5,0 %:sta 7,5 %:iin, mittauskelpoisten tuntien määrä kasvaisi noin 49 % (Jokioinen 2004) ja noin 50 % (Vantaa 2007), mikä olisi merkittävän suuruinen kasvu.

Ulkoilman keskilämpötilan käytön vaikutus

Taulukoissa 5.33 ja 5.34 sekä kuvissa 5.55 ja 5.56 esitetään, miten ulkoilman keskilämpötilan käyttäminen näennäisen U-arvon laskennassa hetkellisen ulkolämpötilan sijaan mitatun lämpövirran lisäksi vaikuttaa mittauskelpoisten tuntien määrään vuodenaika- ja vuositasolla.

Taulukko 5.33 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

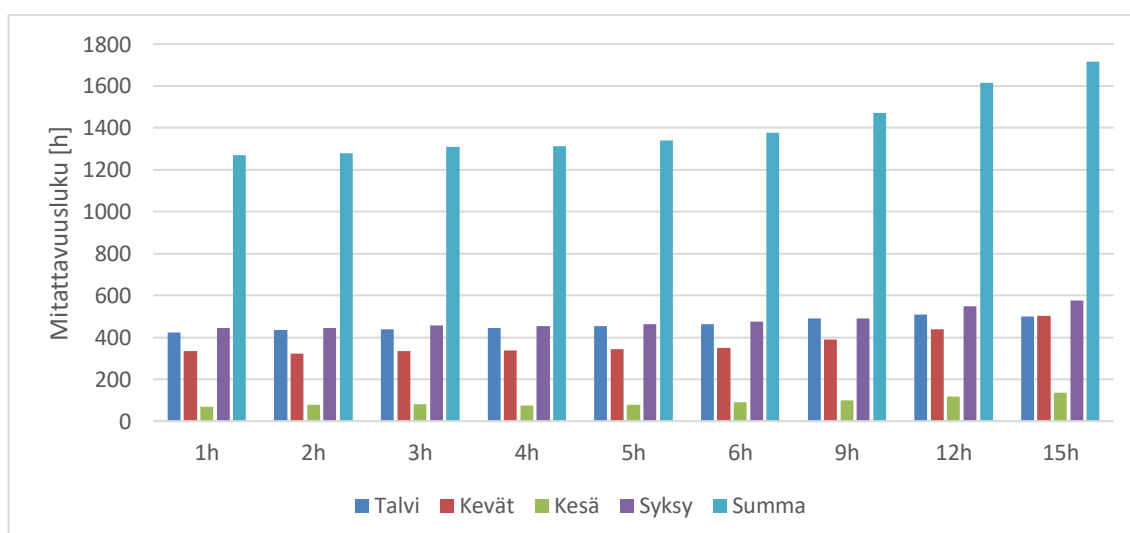
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	1352	1371	1380	1413	1436	1466	1542	1659	1779
OSUUS	15 %	16 %	16 %	16 %	16 %	17 %	18 %	19 %	21



Kuva 5.55 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoin.

Taulukko 5.34 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Vantaan 2007 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla.

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	9h	12h	15h
SUMMA	1270	1278	1309	1313	1341	1377	1471	1614	1715
OSUUS	14 %	15 %	15 %	15 %	15 %	16 %	17 %	18 %	20



Kuva 5.56 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut pohjoisseinälle Jokioisten 2004 testivuodella eri mittaiselta ajalta laskettujen ulkoilman keskilämpötilojen avulla vuodenajoin.

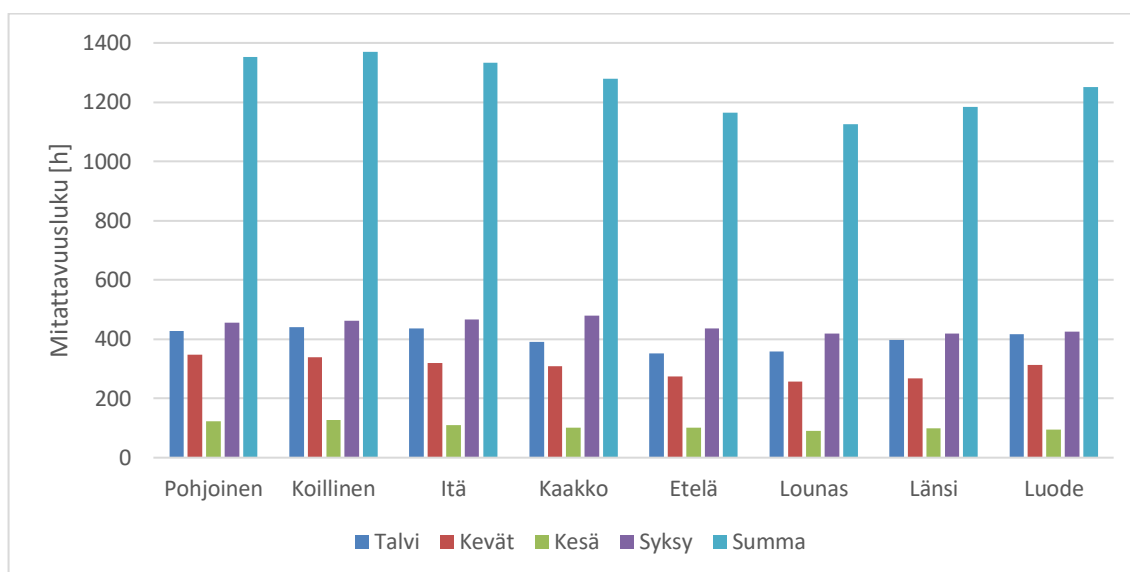
Taulukoiden 5.33 ja 5.34 sekä kuvien 5.55 ja 5.56 perusteella näyttää siltä, että rakenteen W6 tapauksessa voitaisiin mittauskelpoisten tuntien määrää kasvattaa merkittävästi (35 %) Vantaan 2007 ilmastossa ja (32 %) Jokioisten 2004 ilmastossa käyttämällä mitatusta lämpövirrasta lasketun U-arvon laskennassa ulkoilman lämpötilan keskiarvoa. Mitattavuusluku kasvaa koko ajan käytettävän keskiarvon pidentyessä 15 h saakka, tosin osa kasvusta osuu kesäaikaan, jolloin kyse saattaa olla yksittäisistä mittauskelpoisista tunteista.

Ilmansuunnan vaikutus

Taulukoissa 5.35 ja 5.36 sekä kuvissa 5.57 ja 5.58 esitetään ilmansuunnan ja vuodenajan vaikutuksia mitattavuuslukuihin seinärakenteen W6 tapauksessa.

Taulukko 5.35 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Jokioisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

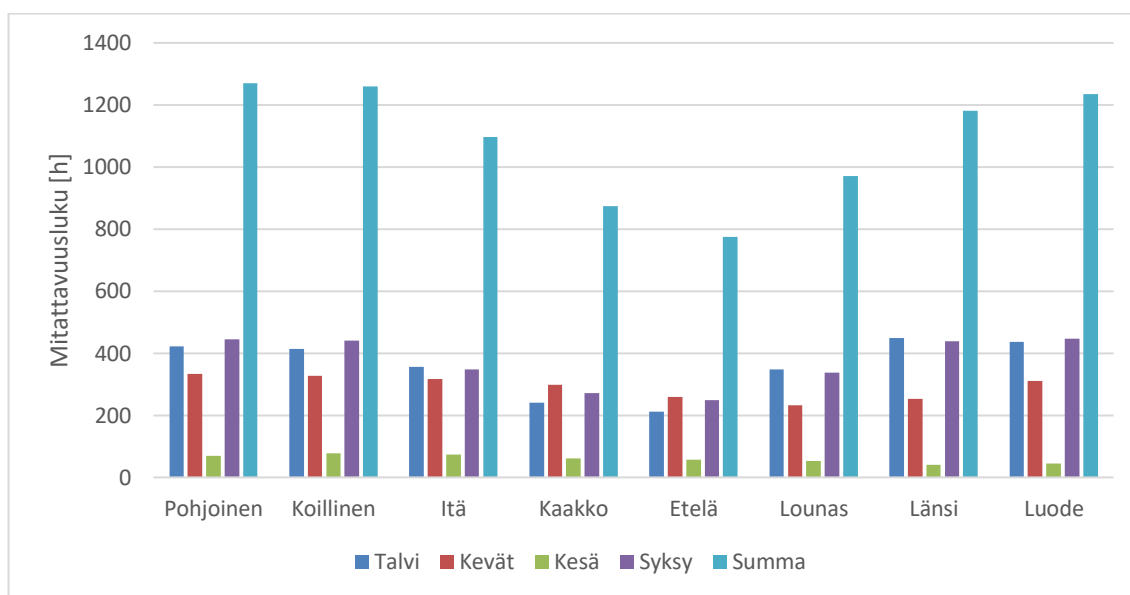
	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	128	129	128	131	133	135	139	131	18 %
Helmi	147	147	145	120	107	124	143	144	20 %
Maalis	174	170	168	168	154	155	145	165	22 %
Huhti	91	91	75	62	49	45	54	76	9 %
Touko	82	78	76	78	72	57	69	72	10 %
Kesä	54	59	56	48	52	39	35	35	7 %
Heinä	37	38	29	24	24	25	33	32	4 %
Elo	31	31	24	30	25	27	32	28	4 %
Syys	124	123	126	124	107	100	92	118	16 %
Loka	143	147	147	169	154	160	171	138	21 %
Marras	189	192	194	186	175	160	156	170	25 %
Joulu	152	164	164	139	113	99	116	142	18 %
SUMMA	1352	1369	1332	1279	1165	1126	1185	1251	1257
OSUUS	15 %	16 %	15 %	15 %	13 %	13 %	14 %	14 %	14 %



Kuva 5.57 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Joki-oisten 2004 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoin.

Taulukko 5.36 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla.

	Pohjoinen	Koillinen	Itä	Kaakko	Etelä	Lounas	Länsi	Luode	K.A.
Tammi	165	162	175	161	113	156	169	165	21 %
Helmi	96	96	91	69	88	103	117	98	14 %
Maalis	158	151	139	126	103	99	111	137	17 %
Huhti	108	106	110	111	90	85	87	99	14 %
Touko	67	70	69	62	66	49	55	74	9 %
Kesä	30	32	29	24	26	23	17	13	3 %
Heinä	14	20	16	19	17	12	10	13	2 %
Elo	26	26	29	19	15	18	13	18	3 %
Syys	95	94	79	91	76	73	82	83	12 %
Loka	124	125	131	114	106	116	123	131	16 %
Marras	225	221	138	67	66	149	234	232	23 %
Joulu	162	156	91	11	10	88	164	173	14 %
SUMMA	1270	1259	1097	874	776	971	1182	1236	1083
OSUUS	14 %	14 %	13 %	10 %	9 %	11 %	13 %	14 %	12 %



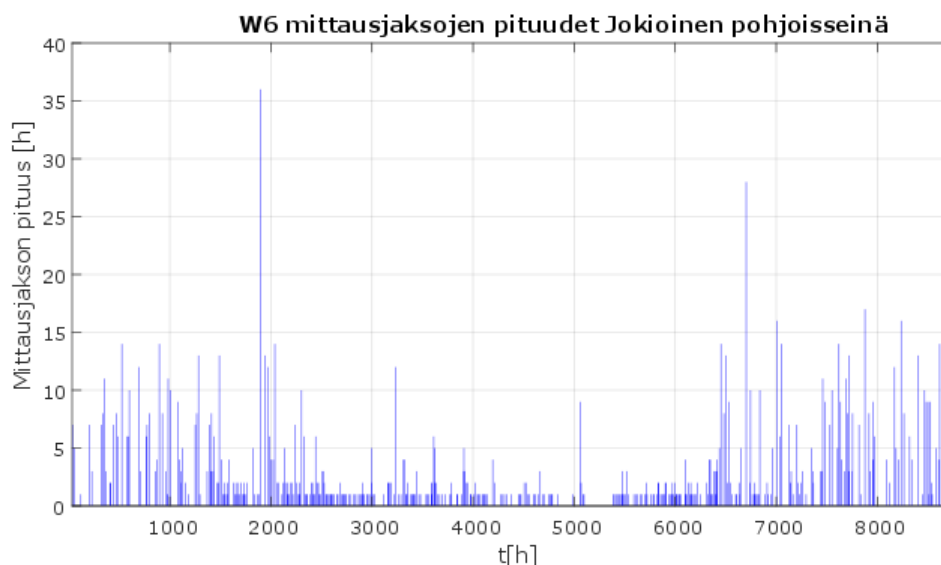
Kuva 5.58 Seinärakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut eri ilmansuuntiin Vantaan 2007 testivuodella laskentahetken ulkoilman lämpötilan avulla vuodenajoin.

Taulukoista 5.35 ja 5.36 sekä kuvista 5.57 ja 5.58 havaitaan, että seinän suuntaus vaikuttaa merkittävästi rakenteen W6 U-arvon mittaamiseen. Vantaan 2007 ilmastossa vaikutus on suurempi, mikä viittaa siihen, että saderasituksen määrä vaikuttaa rakenteen lämpötekniseen käyttäytymiseen. Lisäksi tähän viittaa se, että matalin mitattavuusluku on molemmissa ilmastoissa samassa ilmansuunnassa, johon kohdistuu eniten viistosadetta. Mitattavuusluvut ovat parhaassa ilmansuunnassa 22 % (Jokioinen 2004) ja 64 % (Vantaa 2007) korkeampia verrattuna huonoimpaan ilmansuuntaan. Jokioisissa 2004 parhaat mitausilmansuunnat mitattavuuslukujen perusteella ovat luoteen ja kaakon väliset suunnat ja Vantaalla 2007 lännen ja koillisen väliset ilmansuunnat.

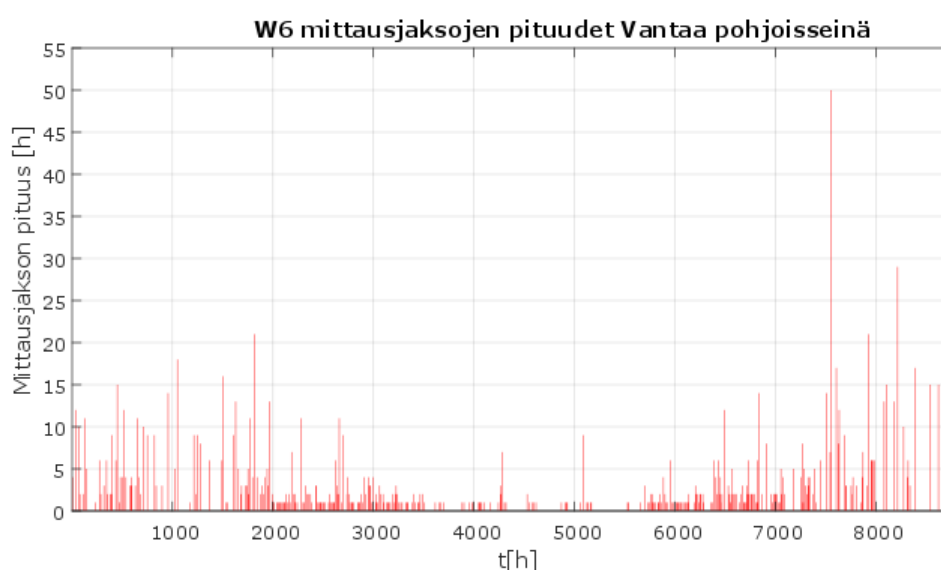
Korkeimmat mitattavuusluvut ovat Jokioisissa 2004 syys-maaliskuussa ja Vantaalla 2007 loka-huhtikuussa. Jokioisten 2004 testivuoden sääolosuhteiden huomataan olevan hieman otollisempia U-arvon mittaamiselle mitattavuuslukujen ollessa hieman korkeampia kuin Vantaan 2007 testivuoden sääolosuhteissa. Vantaan 2007 testivuosi oli joulukuussa sateinen ja lämmin, mikä näkyy matalina mitattavuuslukuina.

Mittauskelpoisten jaksojen pituus ja sijoittuminen

Kuvissa 5.59 ja 5.60 tarkastellaan mittausjaksojen sijoittumista sekä pituutta vuodenajan mukaan. Mittausjaksojen pituudet on laskettu käyttäen sallittuna näennäisen U-arvon poikkeamana vertailuarvosta $\pm 5\%$.



Kuva 5.59 *Seinärakenteelle W6 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen laskettuna Jokioisten 2004 testivuodella pohjoisseinälle.*



Kuva 5.60 *Seinärakenteelle W6 lasketut eri mittaiset mittausjaksot ja niiden sijoittuminen laskettuna Vantaan 2007 testivuodella pohjoisseinälle.*

Kesäaikaan sijoittuvat mittauskelpoiset jaksot ovat kuvien 5.59 ja 5.60 mukaan pääosin alle 3 h pitkiä. Vuoden 2 000 ensimmäisenä ja 2 000 viimeisenä tuntina (noin tammi-maaliskuu ja lokakuun puoliväli-joulukuu) esiintyy selkeästi pidempiä mittausjaksoja ja mittauksen onnistuminen on tällöin todennäköisempää.

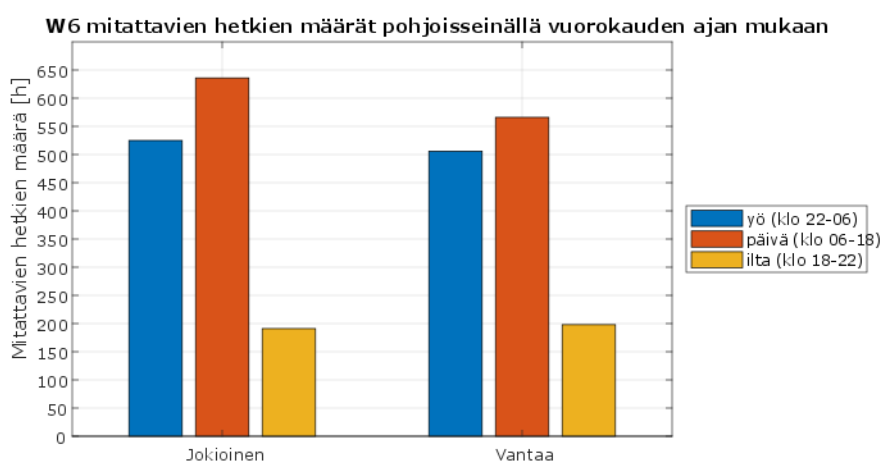
Kuvassa 5.61 esitetään seinärakenteelle W6 laskettujen eri pituisten mittauskelpoisten jaksojen lukumäärien jakaumaa.



Kuva 5.61 Seinärakenteelle W6 lasketut eri mittaiset mittausjaksot Jokioisten 2004 ja Vantaan 2007 ilmastossa pohjoisseinällä.

Kuvasta 5.61 havaitaan, että lyhyitä mittauskelpoisia jaksoja on lukumääräisesti paljon. Korkeintaan 2 h mittaisten jaksojen määrä on 259 kpl yhteensä 400 jaksosta (Jokioinen 2004) ja 215 kpl yhteensä 349 jaksosta (Vantaa 2007). Näiden lyhyiden jaksojen osuus koko vuoden mittauskelpoisesta ajasta on 24 % (Jokioinen 2004) ja 23 % (Vantaa 2007). Vähintään 6 h mittaisten jaksojen määrät ovat 79 kpl (Jokioinen 2004) ja 67 kpl (Vantaa 2007). Nämä pitkät jaksot muodostavat 58 % (Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007) koko vuoden mittauskelpoisesta ajasta.

Alla olevassa kuvassa 5.52 esitetään mittauskelpoisten hetkien sijoittumista eri vuorokaudenaikoihin laskettuna seinärakenteelle W4.



Kuva 5.62 Seinärakenteen W6 mittauskelpoisten tuntien sijoittuminen vuorokaudenajan mukaan.

Kuvasta 5.62 nähdään, että mittauskelpoisista tunneista sijoittuu yöaikaan noin 40 % kummallakin testivuodella tehdyissä mallinuksissa, joten yöaika on hieman parempaa mittausaikaa kuin päivä. Ilta-ajan tunnit eivät ole suoraan vertailukelpoisia yön ja päivän tunteihin, sillä ilta-aika on määritetty kestoaltaan lyhyemmäksi kuin yö ja päivä.

Seinärakenteelle W6 mallinuksista saadun lämpövirran perusteella laskettu näennäinen U-arvo on suuren osan kylmästä vuodenaajasta korkeampi kuin stationääritilassa laskettu vertailuarvo (ks. liite 6). Syy tälle voi olla materiaalien kosteuspitaisuus, jota SFS-EN ISO 6946:2017 mukaisissa laskelmissa ei oteta huomioon. Kesäaikaan näennäinen U-arvo on lähempänä vertailuarvoa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että seinärakenne W6 on U-arvon mittauksista ajatellen haastava rakenne, mittauskelpoisia hetkiä on ilmansuunnasta riippuen 10-15 % koko vuodesta. Lisäksi 23-24 % mittausajasta sijoittuu korkeintaan 2 h mittaisiin jaksoihin. Rakenteelle W6 lasketut mitattavuusluvut ovat kuitenkin hieman korkeampia kuin heikommin lämpöä eristäville tiilirakenteille W1 ja W5 tai tiili-villa-tiiliseinälle W4. Ulkoilman keskiarvon käytön havaittiin parantavan mitattavuuslukua yli 30 %, joten keskiarvon käyttämistä suositellaan. Suurimmat mitattavuusluvut saatiin laskemalla ulkolämpötilan keskiarvo 15 h ajalta ja käyttämällä tätä lämpötilaeron laskennassa. Mittaukset kannattaa suorittaa seinältä, johon kohdistuu mahdollisimman vähän viistosadetta, samoin kuin kaikilla muillakin tiilirakenteilla.

6. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin erilaisten tekijöiden vaikutuksia Arcada-ammattikorkeakoulussa kehitetyllä nopealla U-arvon mittalaitteella mitattavissa olevaan lämpövirtaan erilaisissa ulkoseinärakenteissa. Tavoitteena oli kehittää mittalaitteen käyttäjille tehtävää ohjeistusta liittyen mittaolosuhteisiin ja tuottaa dataa jatkotutkimusta varten. Tutkimuksessa tehtiin lämpö- ja kosteusteknisiä mallinnuksia kuudelle erilaiselle seinärakenteelle, jotka sijaitsevat lämmitetyissä asuinrakennuksissa Suomessa. Asettamalla kriteerit mittauskelpoiselle ajankohdalle laskettiin mitattavuuslukuja, jotka kuvaavat karkealla tasolla U-arvomittausten luotettavaa toteutettavuutta vuoden eri ajan hetkinä sekä kuinka rakenteen suuntaus vaikuttaa siihen. Mitattavuuslukuja laskettiin erilaisilla kriteereillä ja tutkittiin, minkä tekijöiden vaikutukset mitattavuuteen ovat merkittävimpiä.

Laskentatarkastelut toteutettiin COMSOL Multiphysics -ohjelmalla tunnin aika-askeleella tehdyillä laskentatarkasteluilla, joissa koko laskenta-aika oli 2 vuotta. Seinärakenteet mallinnettiin yksiulotteisina malleina suunnattuna jokaiseen pää- ja väli-ilmansuuntaan. Ulkoilman olosuhteina käytettiin TTY:n ja Ilmatieteen laitoksen kehittämien rakennusfysikaalisten testivuosien ilmastodataa (Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007), johon lisättiin taivaalta tuleva pitkäaaltoinen säteily Jokelan diplomityössään (2018) käyttämän säteilymallin mukaan sekä seinän ja maanpinnan välinen pitkäaaltoinen säteily. Sisäilman olosuhteina käytettiin RIL 107-2012 mukaisia sisäilman kosteuslisän arvoja ja vakiolämpötilaa +21 °C.

Tässä tutkimuksessa saatiin yleiskuva siitä, minkä tyyppiset seinärakenteet ovat haastavia mittausten kannalta ja mitkä helpompia mitattavia sekä mihin vuodenaikaan eri rakenteiden mittaukset olisi järkevää suorittaa. Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää mittalaitteen käyttäjille suunnatun ohjeen laadinnassa ja mittalaitteen kehitystyössä. Tämän tutkimuksen tulokset ovat sovellettavissa rakennusfysikaalisten testivuosien ilmaston kaltaisissa olosuhteissa sijaitseville asuinrakennuksille, joissa ei ole poikkeuksellisen suuria kosteuslähteitä. On huomattava, että nämä mallinnukset on tehty Vantaan 2007 ja Jokioisten 2004 toteutuneilla säätiedoilla. Nämä vuodet on määritetty kosteusteknisen käyttäytymisen kannalta kriittisiksi, mutta ne eivät edusta kuitenkaan keskimääräisesti Suomen ilmastoa. Tulosten soveltamisessa yleisemmin on otettava huomioon käytetty säädata (ks. liite 4). Saderasitus on laskettu 5 m korkealle rakennukselle suuren räsitus-tason mukaan, mutta kovin korkeille rakennuksille näitä tuloksia ei voida soveltaa, sillä saderasitus kasvaa korkeammissa julkisivuissa merkittävästi suuremmaksi.

Työssä käytetyt rakennusfysikaaliset testivuodet on valittu rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiksi vuosiksi ja seinärakenteisiin kohdistuva kosteusrasitus on näinä vuosina suuri. Tästä syystä tässä työssä saadut tulokset kuvaavat tilannetta, jossa

seinärakenteisiin kohdistuva kosteusrasitus on suuri. On siis mahdollista, että joinakin vuosina mittauskelpoisia hetkiä on enemmän kuin tässä työssä tehtyjen laskelmien perusteella. Tosin ilmastoennusteiden mukaan seinärakenteiden kosteusrasitus kasvaa tulevaisuudessa.

Auringon säteilyn ja viistosateen vaikutusten erittely oli haastavaa, sillä mallinnuksia ei ole tehty erikseen vain auringon säteily tai viistosade huomioon ottaen, vaan mallinnuksissa on mukana nämä molemmat. Auringon säteilyn ja viistosateen vaikutuksia analysoitiin eri ilmansuuntiin tehtyjen mallinnusten tulosten perusteella, sillä tiedossa on, minkä suuntaisille pinnoille auringon säteilyä ja viistosadetta eniten kohdistuu. Rajuin viistosaderasitus osuu suurin piirtein samaan ilmansuuntaan kuin suurin auringon suoran säteilyn intensiteetti. Niinpä kaikissa tapauksissa ei pystytty päättämään, johtuuko jonkin ilmansuunnan matala mitattavuusluku enemmän viistosateesta vai auringon säteilystä. On huomattava myös, että auringon säteilyn ja viistosateen yhteisvaikutus on usein kosteuden siirtymisen kannalta merkittävä, sillä rakenteen pintaa lämmittävä säteily nostaa rakenteen ulko-osien lämpötilaa ja siten myös kastuneella rakenteella vesihöyryn osapainetta. Tästä voi seurata imeytyneen sadeveden merkittävä siirtyminen diffuusiolla kohti rakenteen sisäosia.

Taulukossa 6.1 esitetään yhteenvetona eri rakenteiden mallinnuksista saatuja tuloksia. Taulukkoon on laskettu mittauskelpoisen ajan osuus vuodesta eri rakenteille ja mittauskelpoisten, korkeintaan 2 h mittaisen jaksojen, muodostaman ajan osuus kokonaismittausajasta. Lisäksi todetaan, onko ulkolämpötilan keskiarvon käytön havaittu selkeästi kasvattavan mitattavuuslukuja ja jos kyllä, kuinka pitkältä ajalta laskettu keskiarvo antaa korkeimman mitattavuusluvun ja kuinka paljon mitattavuusluku kasvaa verrattuna tilanteeseen, jossa näennäinen U-arvo lasketaan käyttäen lämpövirran mittaushetken ulkolämpötilaa. Ilmansuunnan merkitystä kuvataan luvuilla, jotka kertovat kuinka monta prosenttia suurempi korkein mitattavuusluku on verrattuna matalimpaan.

Taulukko 6.1 Yhteenveto tuloksista eri seinärakenteille, Jok = Jokioinen 2004, Van = Vantaa 2007.

Rakenne	Ilmasto	Pohjoisseinä			Eteläseinä	Ilman-suunta vaikuttaa [%]
		Mitattavuus, $\Delta U \leq 5$ % [%:a vuodesta]	Ulkolämpötilan keskiarvon käyttö selkeästi hyödyksi	Maks. 2 h mittaisten jaksojen osuus mittaus-ajasta [%]	Maks. 2 h mittaisten jaksojen osuus mittaus-ajasta [%]	
W1	Jok	11	Ei	28	40	75
	Van	11	Ei	26	44	105
W2	Jok	39	KYLLÄ (3h, +19 %)	3	3	6
	Van	38	KYLLÄ (3h, +16 %)	2	3	6
W3	Jok	26	KYLLÄ (9 h, +77 %)	12	13	14
	Van	29	KYLLÄ (9 h, +60 %)	9	11	15
W4	Jok	7	Ei	31	37	16
	Van	7	Ei	31	28	15
W5	Jok	13	Ei	26	28	28
	Van	13	Ei (6h, +2 %)	25	37	73
W6	Jok	15	KYLLÄ (15h, +32 %)	24	26	22
	Van	14	KYLLÄ (15h, +35 %)	23	36	64

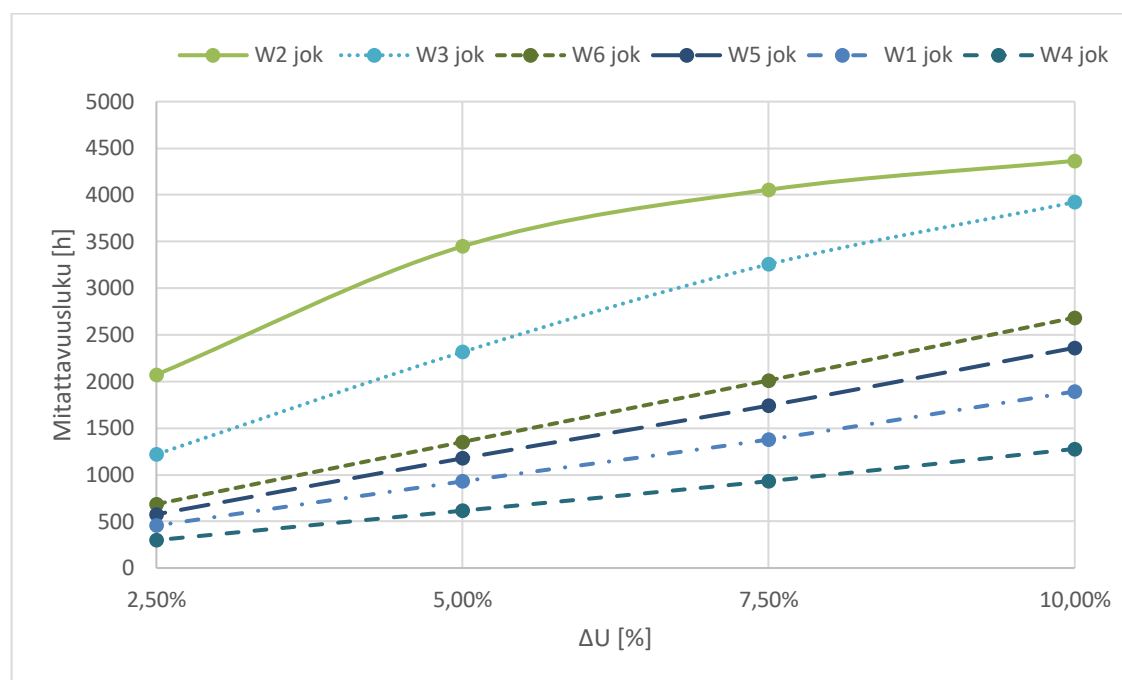
Taulukon 6.1 perusteella matalimmat mitattavuusluvut ovat tiili-villa-tiiliseinällä (W4) ja selkeästi suurimmat puuverhotulla rankaseinällä (W2). Myös betonielementtiseinän (W3) mitattavuusluvut ovat selkeästi suuremmat kuin tiilirakenteilla. Massiivitiiliseinien (W1 ja W6) ja kuorimuurillisen tiiliseinän (W5) mitattavuusluvut ovat jonkin verran korkeampia kuin tiili-villa-tiili -seinällä (W4), mutta selkeästi matalampia kuin rakenteilla W2 ja W3. Lyhyiden, korkeintaan 2 h mittaisten, mittausjaksojen muodostaman ajan osuus yhteenlasketusta mittausajasta on suurin rakenteilla W4 ja W5 sekä massiivitiilirakenteilla W1 ja W6. Rakenteen W3 mittauskelpoisesta ajasta korkeintaan 2 h mittaiset jaksot muodostavat vain noin 10 % ja rakenteella W2 vain 2-3 %. Tuloksista havaittiin myös, että lähes kaikilla rakenteilla oli etelän puolella enemmän lyhyiden mittausjaksojen muodostamaa aikaa verrattuna pohjoisseinään. Erityisesti Vantaan 2007 ilmastossa lyhyiden jaksosten osuus on eteläseinällä suurempi, mikä viittaa viistosateen vaikutukseen, joka tulee pääasiassa etelästä Vantaalla. Ainoan poikkeuksen tähän tekee rakenne W4 Vantaan 2007 ilmastossa, jossa lyhyiden jaksosten osuus mittausajasta on pienempi etelä- kuin pohjoisseinällä.

Mitattavan seinän suuntauksen merkitys on suurin massiivitiilirakenteilla, joilla huonoimman ilmansuunnan mitattavuusluku voi olla vain 50 % parhaasta. Pienin vaikutus seinän suuntauksella on puurankaseinään, jossa parhaan ilmansuunnan mitattavuusluku on noin 6 % korkeampi verrattuna huonoimpaan ilmansuuntaan. Tästä voidaan päätellä, että tuulettuvilla, kevyillä julkisivuilla seinän suuntauksella ei ole kovin suurta merkitystä U-arvon mittauksen kannalta. Tutkimuksen perusteella on selvää, että runsas viistosade vaikuttaa merkittävästi seinärakenteen sisäpinnan lämpövirran tiheyteen ainakin tiilirakenteilla. Tällä perusteella voidaan sanoa, että tiilirakenteiden U-arvon mittaaminen runsaalle viistosateelle altistetulta seinältä ei luultavasti anna luotettavaa tulosta. Myös betonisandwich-seinien mittaukset kannattaisi pyrkiä tekemään muualta kuin viistosateen kastelemalta seinältä.

WUFI:n ja COMSOL:in vertailumallinnuksissa todettiin ohjelmien antamien tulosten välillä olevan joissain tapauksissa merkittäviä eroja lämpövirran tiheyden arvoissa (ks. luku 5.1). Eroja ilmeni massiivitiilirakenteissa, jotka altistuivat rajulle viistosateelle.

Ainoa kriteeri jonkin tietyn hetken mittauskelpoisuudelle, joka voidaan antaa tämän tutkimuksen pohjalta, on se, että ulko- ja sisäilman välillä vallitsevan lämpötilaeron on oltava riittävän suuri (ks. kuva 5.2). Mikäli tämä kriteeri ei täyty, tiedetään, että mittausta ei luultavasti voida suorittaa. Pieni epävarmuustekijä tähän liittyen on se, että seinärakenteen ulkopinnan lämpötila ei välttämättä vastaa lainkaan ulkoilman lämpötilaa, esimerkiksi auringon säteilyn tai pitkäaaltoisen säteilyn vaikutuksen vuoksi. Rakenteen ulkopinnan lämpötilan mittaaminen U-arvomittauksen yhteydessä olisi mittauksen luotettavuuden arvioinnin kannalta erittäin suositeltavaa.

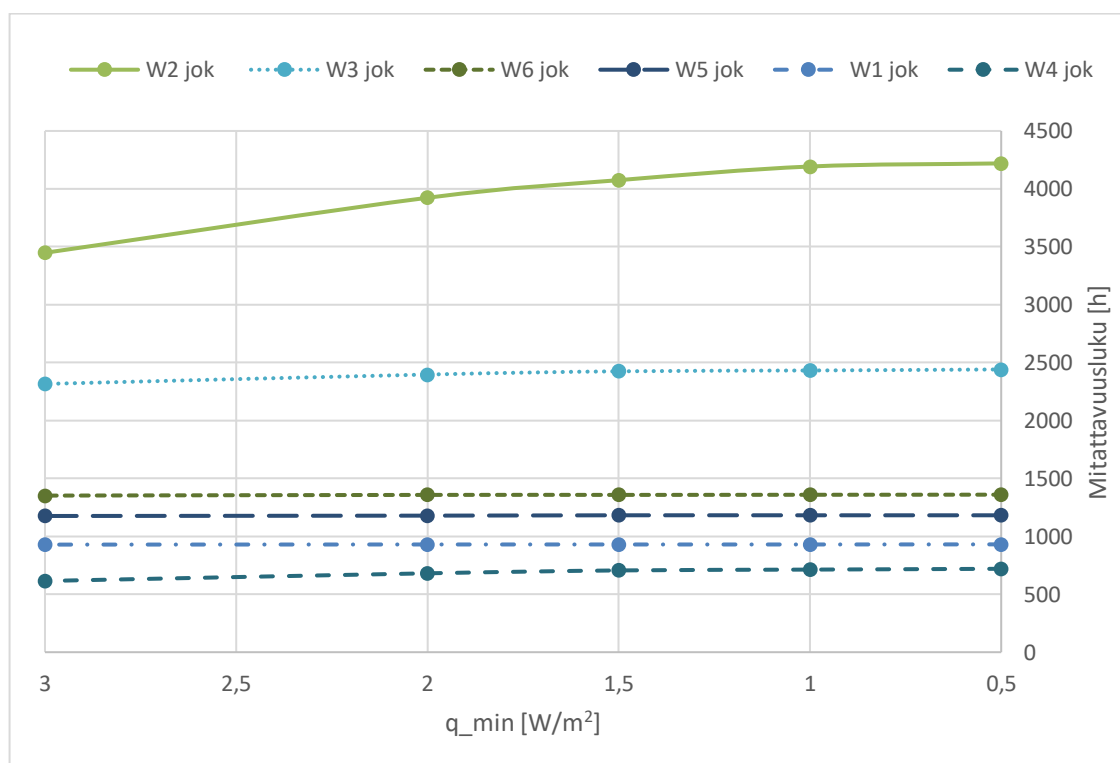
Mitattavuuslukujen kasvu U-arvon sallitun poikkeaman funktiona on esitetty kuvassa 6.1. Vaaka-akselilla kuvassa on sallittu U-arvon poikkeama vertailuarvosta ja pystyakselilla mitattavuusluku tunteina.



Kuva 6.1 Mitattavuusluku U -arvon sallitun poikkeaman funktiona pohjoisella Jokioisten 2004 ilmastossa.

Kuvasta 6.1 nähdään, että U -arvon mittaaminen olisi mahdollista huomattavasti useampana ajanhetkenä, jos näennäisen U -arvon sallittaisiin poikkeavan vertailuarvosta 7,5 tai 10 % tässä tutkimuksessa käytetyn 5,0 % sijaan. Mitattavuusluvun havaittiin kasvavan kaikilla tiilirakenteilla likimain suoraan verrannollisesti sallitun U -arvon poikkeaman suuruuteen, joten mittauskelpoisten hetkien määrä kasvaisi jopa kaksinkertaiseksi, jos hyväksyttäisiin 10 % suuruinen poikkeama U -arvossa. Muilla kuin tiilirakenteilla (W2, W3) mitattavuusluvun kasvu U -arvon sallitun poikkeaman kasvaessa oli selkeää, mutta ei yhtä lineaarista kuin muilla rakenteilla.

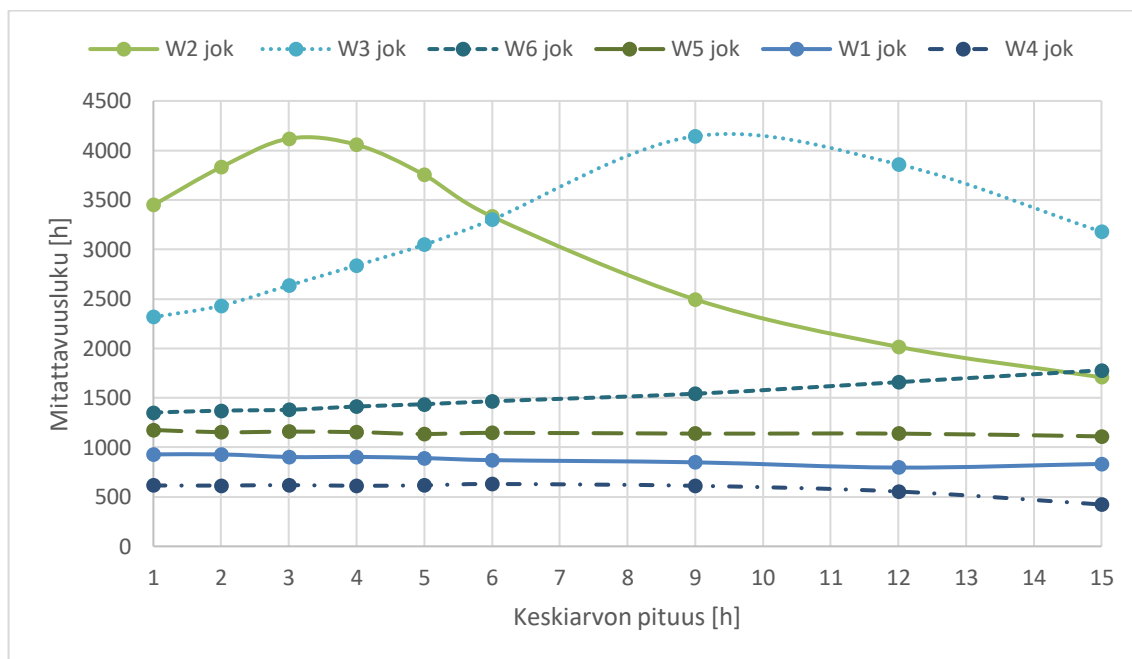
Hyvin lämpöä eristävien rakenteiden mitattavuusluku nousisi myös, mikäli Arcadassa kehitetty nopea U -arvon mittalaite saataisiin mittaamaan pienempiä lämpövirtoja. Tämä mahdollistaisi myös nykyrakentamisessa käytettyjen hyvin eristettyjen rakenteiden mittaamisen muulloinkin kuin talvipakkasilla. Lämpövirran minimivaatimuksen muutoksen vaikutusta mitattavuuslukuun on havainnollistettu kuvassa 6.2, jossa vaaka-akselilla on lämpövirran tiheyden minimivaatimus ja pystyakselilla mitattavuusluku tunteina.



Kuva 6.2 Mitattavuusluku lämpövirran minimivaatimuksen funktiona pohjois-seinällä Jokioisten 2004 ilmastossa. Sallittu U-arvon poikkeama vertailuarvosta on 5,0 %.

Kuvasta 6.2 nähdään, että rakenteilla W2 ja W3 mitattavuusluvun kasvu on helposti nähtävissä, rakenteella W4 kasvu on hyvin pientä. Heikosti lämpöä eristävillä rakenteilla W1, W5 ja W6 lämpövirran tiheys on niin suuri, että Arcadassa kehitetyn U-arvon mittalaitteen lämpövirran tiheyden minimivaatimus ei merkittävästi vaikuta näiden rakenteiden mittaamiseen. Kehittämällä mittalaitteen kykyä mitata nykyistä pienempiä lämpövirtoja ja hyväksymällä hieman 5,0 %:a suurempi poikkeama verrattuna U-arvon vertailuarvoon, mittauskelpoisten hetkien määrä kasvaisi oletettavasti merkittävästi, mutta näiden molempien toimenpiteiden yhtäaikaista vaikutusta ei tarkasteltu tässä työssä.

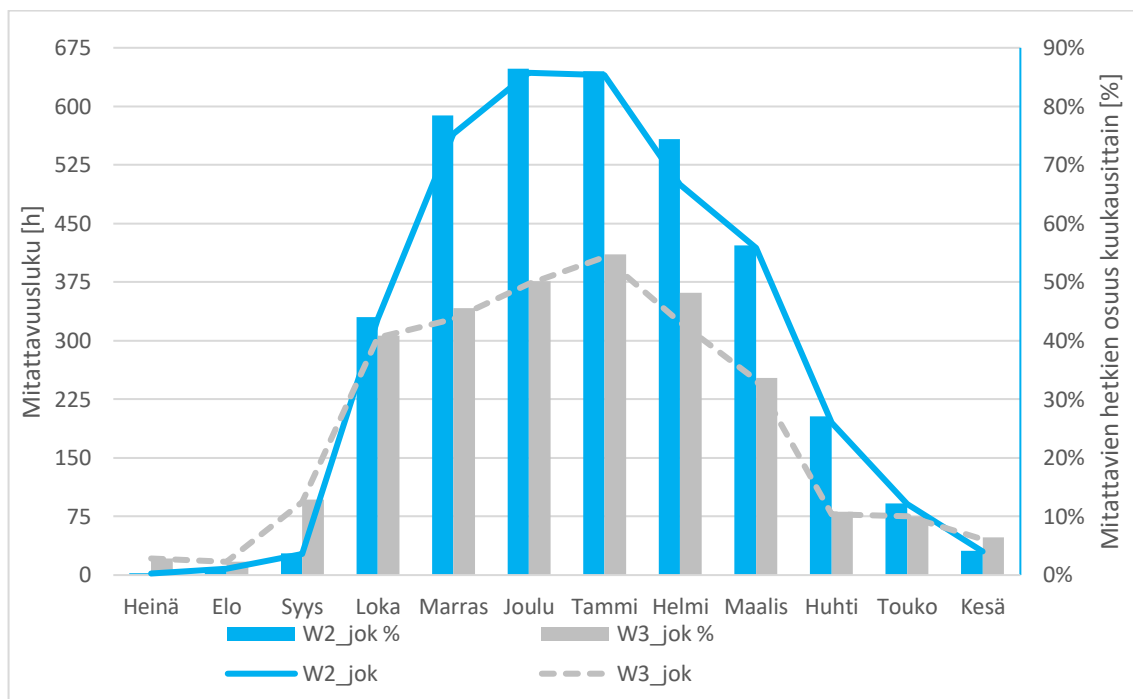
Ulkoilman lämpötilan keskiarvon käytön vaikutusta mitattavuuslukuun on havainnollistettu kuvassa 6.3.



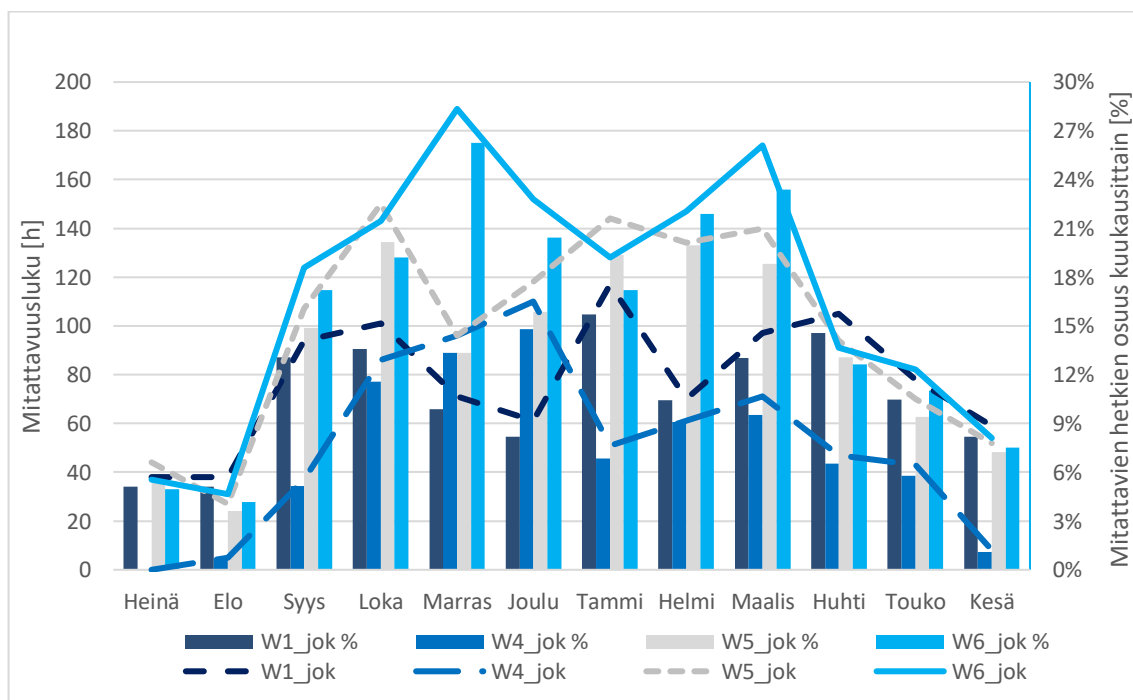
Kuva 6.3 Mitattavuusluku liukuvan ulkoilman lämpötilan keskiarvon pituuden funktiona pohjoisseinällä Jokioisten 2004 ilmastossa.

Kuvasta 6.3 nähdään, että ulkoilman lämpötilan keskiarvon käyttö U-arvon laskennassa mittaustuloksista kasvattaa mitattavuuslukuja rakenteilla W2, W3 ja W6. Parhaimmillaan mitattavuusluku kasvoi lähes 80 %. Rakenteilla W1, W4 ja W5 ulkoilman keskilämpötilan käytöllä ei havaittu olevan minkäänlaista mitattavuuslukua parantavaa vaikutusta.

Kuvissa 6.4 ja 6.5 on esitetty mitattavuusluvut Jokioisten 2004 testivuoden olosuhteissa pohjoisseinälle laskettuna kaikilla tutkimuksessa olleilla rakenteilla eri kuukausina. Lämpövirran tiheyden ja suunnan sekä U-arvon sallitun poikkeaman osalta on käytetty luvun 5.4 alussa määriteltyjä kriteerejä.



Kuva 6.4 Mitattavuusluku seinärakenteilla W2 ja W3 eri kuukausina pohjoisseinällä Jokioisten 2004 ilmastossa.



Kuva 6.5 Mitattavuusluku seinärakenteilla W1, W4, W5 ja W6 eri kuukausina pohjoisseinällä Jokioisten 2004 ilmastossa.

Kuvasta 6.4 havaitaan, että rakenteiden W2 ja W3 mitattavuusluvut jakautuvat hyvin samalla tavalla eri kuukausina. Myös suhteellisesti mittauskelpoinen aika on suurimmillaan molemmilla rakenteilla joulutammikuussa. Erona on se, että rakenteella W2 mitattavuusluvut ovat talvella selvästi korkeampia kuin rakenteella W3. Kesäaikaan mitattavuusluvut

ovat lähes samat ja hyvin pieniä riippumatta rakenteesta. Kummakin rakenteen mittaaminen touko-syyskuussa on vaikeaa vähäisten mittaukseen soveltuvien hetkien takia.

Kuvasta 6.5 nähdään, että rakenteiden mitattavuusluvuista piirretyt käyrät käyttäytyvät eri tavoin riippuen rakenteesta, lukuun ottamatta huhtikuun ja syyskuun välistä aikaa. Seinärakenteen W1 suurimmat mittauskelpoisten tuntien osuudet osuvat syys-lokakuuhun, tammikuuhun ja maaliskuuhun. Seinärakenteella W4 on suhteellisesti eniten mittauskelpoista aikaa loka-joulukuussa. Seinärakenteella W5 vastaavat ajankohdat ovat lokakuu ja tammi-maaliskuu. Seinärakenteella W6 korkeimmat mitattavien hetkien suhteelliset osuudet ovat marraskuussa ja helmi-maaliskuussa. Tammikuussa seinärakenteen W6 mittauskelpoisten tuntien suhteellinen osuus on vasta kuudenneksi korkein kuukausista.

Kuvista 6.4 ja 6.5 havaitaan, että tässä tutkimuksessa mukana olevien hyvin lämpöä eristävien rakenteiden (W2, W3) U-arvon mittaamiselle parhaita kuukausia mallinuksissa käytettyjen ilmastojen kaltaisissa olosuhteissa ovat loka-maaliskuu. Puurankaseinällä W2 myös huhtikuun mitattavuusluvut ovat vielä melko korkeita. Massiivitiiliseinällä W1 korkeimmat mitattavuusluvut ovat syys-lokakuussa, tammikuussa sekä maaliskuussa, rakenteella W6 mitattavuusluku on melko korkea aikavälillä syys-maaliskuu. Seinärakenteella W5 korkeimmat mitattavuusluvut sijoittuvat lokakuuhun sekä tammi-maalikuuhun. Kuvista 6.4 ja 6.5 nähdään lisäksi, että seinärakenteet W2 ja W3 ovat selkeästi helpommin mitattavissa kuin muuta tässä tutkimuksessa mukana olleet rakenteet, sillä niiden mitattavuusluvut ovat merkittävästi suurempia.

Tutkimuksessa havaittiin, että seinärakenteen W4 mitattavuusluvut ovat massiivitiilirakenteita W1 ja W6 pienempiä suurimman osan vuotta. Varmuutta siitä, miksi seinärakenteen W4 mitattavuusluvut ovat pienempiä kuin massiivitiiliseinillä ei voida tämän tutkimuksen perusteella sanoa. Eräs syy alhaiselle mitattavuusluvulle saattaa olla se, että rakenteessa W4 ulkokuori on erotettu lämmöneristeellä sisäkuoresta, mistä johtuen seinärakenne käyttäytyy lämpö- ja kosteusteknisesti eri tavalla kuin massiivitiiliseinä. Ulkokuoren lämpötila vaihtelee eristekerroksesta johtuen enemmän kuin massiivitiiliseinän ulko-osan lämpötila, sillä lämpö ei pääse tasaantumaan johtumalla lämmöneristeen läpi yhtä hyvin kuin tiileissä. Kylmänä vuodenaikana sisältä ulospäin kulkeva lämpövirta on eristekerroksesta johtuen selvästi pienempi rakenteessa W4 kuin massiivisissa tiiliseinissä, jolloin ulkokuori jäähtyy massiivitiiliseinien ulko-osia enemmän. Lämpimänä aikana auringon paistaessa ulkokuoren lämpötila taas voi nousta korkeammaksi kuin massiivitiiliseinällä eristekerroksen hidastaessa lämmön johtumista kohti seinän sisäpintaa. Tämä suurempi ulkokuoren lämpötilojen vaihtelu saattaa selittää sen, miksi seinärakenne W4 on harvemmin lähellä stationääritilaa ja siten heikommin mitattavissa kuin massiivitiilirakenteet. Sisältä ulospäin kulkeva massiivirakenteita pienempi lämpövirta voi myös hidastaa rakenteen W4 kuivumista verrattuna massiivitiiliseiniin.

Seinärakenteen W4 ero muihin tässä työssä tarkasteltuihin hyvin eristettyihin rakenteisiin on se, että tiilikuorella on melko suuri ominaislämpökapasiteetti ja suuri vedenimukyky. Betonisandwichrakenteen W3 ulkokuorella on myös korkea ominaislämpökapasiteetti, mutta betoniin ei imeydy yhtä paljon viistosadetta kuin tiileen. Lautaverhotun seinän W2 ulko-osilla taas ei ole juurikaan lämpökapasiteettia eikä viistosade imeydy rakenteeseen juurikaan.

Tämän tutkimuksen pohjalta havaittiin useita mahdollisia lisätutkimusaiheita. Tämän työn mallinnuksissa sisällä vallitsivat vakio-olosuhteet. Olisi hyödyllistä tutkia kuinka paljon ja kauan sisälämpötilan hetkellisellä muutoksella, esimerkiksi ikkunan tai oven kautta tuulettamisella, on vaikutusta U-arvon mittaamiseen kyseisen tilan seinärakenteesta. Oletettavasti mittaus on herkkä hyvin pienillekin sisälämpötilan muutoksille, mutta tätä aihetta ei tutkittu tässä työssä eikä myöskään otettu kantaa siihen, miten vakaa sisälämpötila tulisi varmistaa. Toinen mahdollinen tutkimusaihe voisi olla seinärakenteessa sijaitsevien kylmäsiltojen vaikutusalueen tutkiminen eli se, kuinka kauas kylmäsilta mittalaite on asennettava, jotta kylmäsilta ei vaikuta mittaukseen merkittävästi. Ulkoilman keskiarvon käytön sekä sallitun U-arvon poikkeaman kasvattamisen vaikutukset mittausjaksojen pituuteen ja sijoittumiseen olisi myös hyvä selvittää. Sallittua U-arvon poikkeamaa voisi myös kasvattaa vielä suuremmaksi kuin 10 % ja mitattavuusluvuista rajata pois vain 1 h mittaiset sekä yöaikaan sijoittuvat mittauskelpoiset jaksot ja tarkastella näiden toimenpiteiden vaikutuksia mitattavuuslukuihin. Referenssinä käytetyn stationääritilan U-arvon voisi myös laskea uudelleen käyttäen lämmönjohtavuuden arvoja esim. suhteellisen kosteuden arvolla 80 % RH tai muulla edustavaksi katsotulla kosteuspitoisuudella ja tarkastella tämän vaikutusta mitattavuuslukuihin.

Tässä tutkimuksessa mallinnetut rakenteet eivät sisältäneet ylä- tai alapohjarakenteita tai maanvastaisia seinärakenteita, joiden käyttäytyminen eronnee merkittävästi tässä työssä tarkastelluista seinärakenteista eikä tämän työn tuloksia voi yleistää koskemaan niitä. Yläpohjissa auringon säteilyn sekä taivaan pitkäaaltoisen säteilyn vaikutukset ovat oletettavasti paljon merkittävämpiä kuin seinärakenteissa. Osan vuodesta yläpohjarakenne voi olla myös lumikerroksen peittämä. Maanvastaisissa rakenteissa rakenteen yli vallitseva lämpötilaero taas on usein pienempi, mutta pysyy vakaampana kuin seinärakenteissa. Olisi myös hyödyllistä tutkia lisää COMSOL:in ja WUFI:n eroja viistosateen huomioon ottamisessa laskelmissa.

LÄHTEET

- AHMAD, A., MASLEHUDDIN, M. and AL-HADHRAMI, L.M., 2014. In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls. *Energy and Buildings*, **84**, pp. 132-141.
- ALBATIĆI, R. and TONELLI, A.M., 2010. Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, **42**(11), pp. 2177-2183.
- ALBATIĆI, R., TONELLI, A.M. and CHIOGNA, M., 2015. A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. *Applied Energy*, **141**, pp. 218-228.
- ANDÚJAR MARQUEZ, J.M., MARTÍNEZ BOHÓRQUEZ, M.À and GÓMEZ MELGAR, S., 2017. A New Metre for Cheap, Quick, Reliable and Simple Thermal Transmittance (*U-value*) Measurement in Buildings. *Sensors (Basel, Switzerland)*, **17**(9).
- ARCADA, 2019-last update, Introducing the U-meter, - Arcada U-value meter and real estate energy [Homepage of Arcada Research, Development & Innovation], [Online]. Available: <https://rdi.arcada.fi/energy/en/rapid-u-value-metering/introducing-the-u-value-instrument/> [1/14, 2019].
- ASAN, H., 1998. Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, **28**(3), pp. 299-305.
- ASDRUBALI, F., D'ALESSANDRO, F., BALDINELLI, G. and BIANCHI, F., 2014. Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study. *Case Studies in Construction Materials*, **1**, pp. 53-59.
- ATSONIOS, I.A., MANDILARAS, I.D., KONTOGEORGOS, D.A. and FOUNTI, M.A., 2017. A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls. *Energy and Buildings*, **154**, pp. 198-206.
- BRE, 2017. *Solid wall heat losses and the potential for saving energy. Rapid measurement device test report - Summary*. BRE.
- BURNETT, D.S., 1987. *Finite element analysis: from concepts to applications*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- ÇENGEL, Y.A. and GHAJAR, A.J., 2011. *Heat and mass transfer : fundamentals & applications*. 4. in SI Units edn. New York: McGraw-Hill.
- CHAPRA, S.C. and CANALE, R.P., 1998. *Numerical methods for engineers : with programming and software applications*. 3rd. edn. Boston (MA): McGraw-Hill.
- COMSOL, 2017a. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. Stockholm: COMSOL.

COMSOL, 21.2.2017, 2017b-last update, Multiphysics Cyclopedia [Homepage of COMSOL Inc.], [Online]. Available: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method> [10/8, 2018].

COMSOL, 2018, , Understand, Predict, and Optimize Physics-Based Designs and Processes with COMSOL Multiphysics® [Homepage of COMSOL inc.], [Online]. Available: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> [17/12, 2018].

DECONINCK, A., 2017. *Reliable thermal resistance estimation of building components from on-site measurements*, KU Leuven.

DECONINCK, A. and ROELS, S., 2016. Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements. *Energy and Buildings*, **130**, pp. 309-320.

DESOGUS, G., MURA, S. and RICCIU, R., 2011. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*, **43**(10), pp. 2613-2620.

DORAN, S., 2000. *Safety and Health Business Plan. Field Investigations of the thermal performance of construction elements as built. 36/8/79 cc1637 Final Report. 78132*. Building Research Establishment Ltd.

EUROPEAN COMMISSION, 2018-last update, Buildings - European Commission [Homepage of European Commission], [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> [11/7, 2018].

EVANGELISTI, L., GUATTARI, C., GORI, P. and DE LIETO VOLLARO, R., 2015. In Situ Thermal Transmittance Measurements for Investigating Differences between Wall Models and Actual Building Performance. *Sustainability*, **7**(8), pp. 10388.

FICCO, G., IANNETTA, F., IANNIELLO, E., D'AMBROSIO ALFANO, F.R. and DELL'ISOLA, M., 2015. U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. *Energy and Buildings*, **104**, pp. 108-121.

FOKAIDES, P.A. and KALOGIROU, S.A., 2011. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*, **88**(12), pp. 4358-4365.

FRAUENHOFER IBP, 2018-last update, What is WUFI? [Homepage of Fraunhofer IBP], [Online]. Available: <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/> [17/12, 2018].

GASPAR, K., CASALS, M. and GANGOLELLS, M., 2018. In situ measurement of façades with a low U-value: Avoiding deviations. *Energy and Buildings*, **170**, pp. 61-73.

GASPAR, K., CASALS, M. and GANGOLELLS, M., 2016. A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. *Energy and Buildings*, **130**, pp. 592-599.

GEMMELL, A., DORAN, S., ZAPATA, G., TWEED, C., SUFFOLK, C. and FORMAN, T., 2014. *Solid wall heat losses and the potential for energy saving. Literature review*. BRE.

GREENTEG, 2018a-last update, gO Measurement-System [Homepage of greenTEG], [Online]. Available: <https://www.greenteg.com/gO%20Measurement-System/> [1/14, 2019].

GREENTEG, 2018b-last update, U-value Measurements with greenTEG's U-Value Kit [Homepage of greenTEG], [Online]. Available: <https://www.greenteg.com/U-Value/> [1/14, 2019].

GRINGER, P., 2013-last update, Revised diagram with re-aligned spectrum [Homepage of <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>], [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrumrevised.png [12/11, 2018].

HAGENTOFT, C., 2001. *Introduction to building physics*. Lund: Studentlitteratur.

HENS, H.S.L., 2017. *Building Physics - Heat, Air and Moisture : Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische.

HOLMSTRÖM, J., KANTOLA, J., KAURIINVAHA, E., KETTUNEN, A., KOMULAINEN, J., LAAMANEN, P., LAINE, K., MAKKONEN, H., NIEMI, S., PITKÄRANTA, M., SAARINEN, J., SANDSTRÖM, V., TUOVINEN, H. and VILJANEN, K., 2016. *Ympäristöopas 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus*. Helsinki: Ympäristöministeriö.

INCROPERA, F.P. and DEWITT, D.P., 1985. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2. ed edn. New York: Wiley.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2018. *SFS-EN ISO 7345:2018 Thermal performance of buildings and building components. Physical quantities and definitions*. 2. edn. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017a. *SFS-EN ISO 10211:2017 Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations*. 2. edn. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017b. *SFS-EN ISO 6946:2017 Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009. *SFS-EN ISO 15927-3:2009 Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008. *SFS-EN ISO 10456 + AC Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet*.

Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. 3. edn. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1994. *ISO 9869 Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.* 1. edn. Switzerland: International Organization for Standardization.

JOKELA, T., 2018. *Kipsilevytuulensuojallisten puurunkoisten ulkoseinien rakennusfysiikkaalinen toiminta*, Tampereen teknillinen yliopisto.

KALEMA, T., JÓHANNESSON, G., PYLSY, P. and HAGENGRAN, P., 2008. Accuracy of Energy Analysis of Buildings: A Comparison of a Monthly Energy Balance Method and Simulation Methods in Calculating the Energy Consumption and the Effect of Thermal Mass. *Journal of Building Physics*, **32**(2), pp. 101-130.

KIM, S.-., KIM, J.-., JEONG, H.-. and SONG, K.-., 2018. Reliability field test of the air-surface temperature ratio method for in situ measurement of U-values. *Energies*, **11**(4),.

KIVELÄ, M., 2016. *U-arvon mittalaitteen kenttätestaukset*, Hämeen ammattikorkeakoulu.

KNARUD, J.I. and GEVING, S., 2017. Comparative study of hygrothermal simulations of a masonry wall, *11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway*, October 2017 2017, pp. 771-776.

KONTOLEON, K.J. and EUMORFOPOULOU, E.A., 2008. The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*, **33**(7), pp. 1652-1664.

KONTOLEON, K.J. and BIKAS, D.K., 2005. Thermal mass vs. thermal response factors: determining optimal geometrical properties and envelope assemblies of building materials, *International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, 5/2005* 2005, Laboratory of Building Construction & Physics, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, pp. 345.

LINDBERG, R.W., RANTALA, J.V., LEIVO, V.M. and KIVISTE, M., 2012. Effect of massive outer leaf of an insulated cavity brick wall on heat loss. *Journal of Building Physics*, **36**(2), pp. 198-211.

LUCCHI, E., 2017. Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements. *Energy and Buildings*, **134**, pp. 171-184.

MÄKITALO, M., 2012. *Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa*, Tampereen teknillinen yliopisto.

- MENG, X., GAO, Y., WANG, Y., YAN, B., ZHANG, W. and LONG, E., 2015. Feasibility experiment on the simple hot box-heat flow meter method and the optimization based on simulation reproduction. *Applied Thermal Engineering*, **83**, pp. 48-56.
- NICOLAI, A. and GRÜNEWALD, J., 2006. Delphin 5.8.1 user help.
- NICOLAISEN, A., 2005. Thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation material. *Building and Environment*, **40**(7), pp. 907-914.
- PARONEN, M. and SKÖN, K., 2017. *Method and apparatus for measuring heat flow through constructions*. G01K17/20;G01N25/18.
- PARONEN, M., BISTRÖM, D. and SKÖN, K., 2018. *Instructions for the Arcada rapid U-value meters and how to measure U-values with respective devices*. Luonnos 12.10.2018 edn. Not available: .
- PEAVY, B., POWELL, F. and BURCH, D., 1973. *Dynamic Thermal Performance of an Experimental Masonry Building*. 45. Washington D.C.: Building Environment Division Center for Building Technology Institute for Applied Technology National Bureau of Standards.
- PENG, C. and WU, Z., 2008. In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction. *Energy and Buildings*, **40**(11), pp. 2076-2082.
- RAKENNUSTIETO OY, 2016. *RT 14-11239 Rakennuksen lämpökuvaus*. Rakennustieto Oy.
- RASOOLI, A., ITARD, L. and FERREIRA, C.I., 2016. A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings. *Energy and Buildings*, **119**, pp. 51-61.
- REILLY, A. and KINNANE, O., 2017. The impact of thermal mass on building energy consumption. *Applied Energy*, **198**, pp. 108-121.
- RYE, C. and SCOTT, C., 2010. *The SPAB research report 1. U-value report. Revised November 2012*. Society for the Protection Ancient Buildings.
- SCARPA, M., RUGGERI, P., PERON, F., CELEBRIN, M. and DE BEI, M., 2017. New Measurement Procedure for U-value Assessment via Heat Flow Meter. *Energy Procedia*, **113**, pp. 174-181.
- SCHMIDT, T., 2012. *WUFI Pro 5.2 online help*. Fraunhofer Institut for Building Physics.
- SØRENSEN, L., Schiøtt, 2010. Energy Renovation of Buildings Utilizing the U-value Meter, a New Heat Loss Measuring Device. *Sustainability*, **2**(2), pp. 461.
- SUOMEN RAKENNUSINSINÖÖRIEN LIITTO, 2012. *Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet*. Uus. p. edn. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

TEJEDOR, B., CASALS, M., GANGOLELLS, M. and ROCA, X., 2017. *Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades*.

ULGEN, K., 2002. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, **34**(3), pp. 273-278.

VANESSA, S., MARTIN, K., BRUNO, G. and COLIN, C., 2016. The Effect of Thermal Mass on Annual Heat Load and Thermal Comfort in Cold Climate Construction. *Journal of Cold Regions Engineering*, **30**(1), pp. 04015002.

VERBEKE, S. and AUDENAERT, A., 2018. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, pp. 2300-2318.

VINHA, J., 2014. *Rakennusfysiikka. 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

VINHA, J., 2011. *RTEK-3511 Rakennusfysiikka Luentomoniste 2011 Osa 1*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

VINHA, J., LAUKKARINEN, A., MÄKITALO, M., NURMI, S., HUTTUNEN, P., PAKKANEN, T., KERO, P., MANELIUS, E., LAHDENSIVU, J., KÖLIÖ, A., LÄHDESMÄKI, K., PIIRONEN, J., KUHNÖ, V., PIRINEN, M., AALTONEN, A., SUONKETO, J., JOKISALO, J., TERIÖ, O., KOSKENVESA, A. and PALOLAHTI, T., 2013. *Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*. Tutkimusraportti 159. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka.

WINGFIELD, J., BELL, M., MILES-SHENTON, D., SOUTH, T. and LOWE, B., 2008. *Lessons from Stamford Brook. Understanding the Gap between Designed and Real Performance*. 8. Leeds Metropolitan University.

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ, 2016. *Energiatodistusopas. Liite 1. Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnitteluarvoja*. Ympäristöministeriö.

LIITTEET:

LIITE 1: TARKASTELTAVIEN RAKENTEIDEN RAKENNETYYYPIT

LIITE 2: PARAMETRIT JA KERTOIMET RAKENTEILLE

LIITE 3: MATERIAALIOMINAISUUDET

LIITE 4: ULKOILMAN OLOSUHTEET

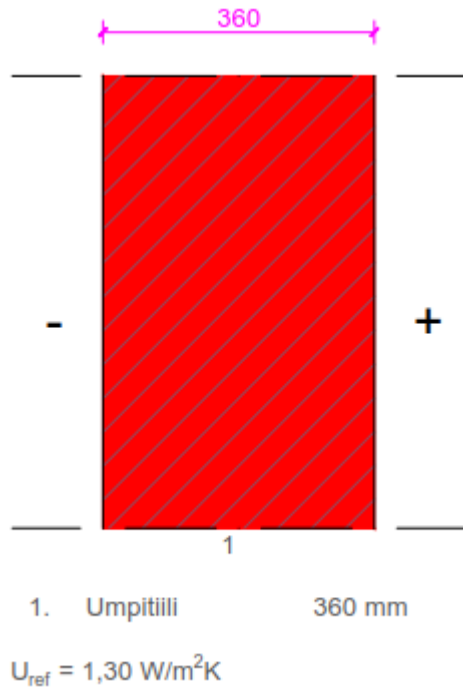
LIITE 5: LASKENNAN TULOKSENA SAATUJA U-ARVON KUVAAJIA

LIITE 6: KOSTEUDENSIIRRON VAIKUTUS RAKENTEIDEN SISÄPINNAN LÄMPÖVIRRAN TIHEYTEEN

LIITE 1: TARKASTELTAVIEN RAKENTEIDEN RAKENNETYYYPIT

W1 Massiivitiiliseinä

Seinärakenne W1 on massiivitiiliseinä, joka on muurattu poltetuista savitiilistä. Suomessa rakenne on ollut hyvin yleinen 1950-luvulle asti. Tässä työssä analysoitavassa tiiliseinässä ei ole pinnassa lainkaan rappausta.

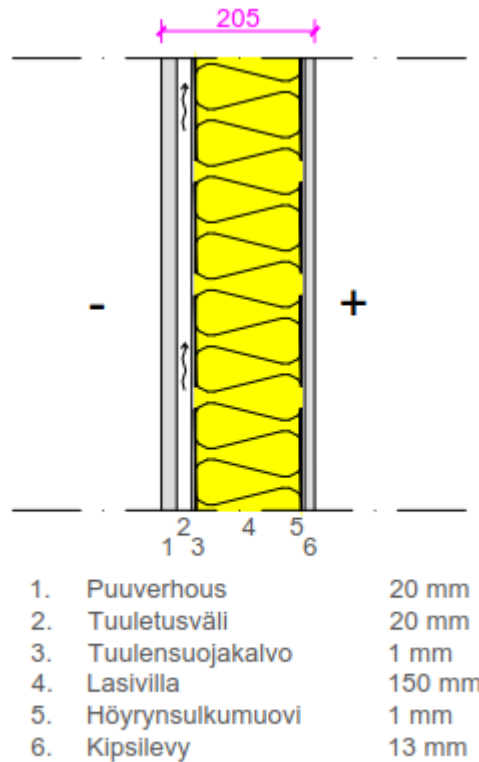


Kuva L1.1. Seinärakenteen W1 rakenneleikkaus.

Tässä työssä mallinnukset tehtiin yksiulotteisina, joten muuraussiteiden tai muiden vastaavien epähomogeenisten kohtien vaikutuksia ei otettu huomioon.

W2 Puurankarakenteinen seinä

Seinärakenne W2 on suomalaisille pientaloille tyypillinen puurankarakenteinen seinä. Rakenteessa on puupaneeliverhous, jonka takana on tuuletusväli sekä koolaukset, tuulensuojakalvo, runkotolpat, joiden väliin mineraalivillaeriste on asennettu sekä sisäpinnassa höyrynsulkukalvo ja yksinkertainen kipsilevytys.



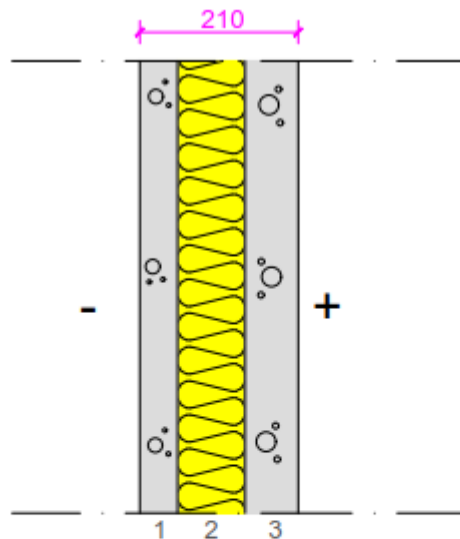
$$U_{\text{ref}} = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kuva L1.2. Seinärakenteen W2 rakenneleikkaus.

Tässä työssä rakenne mallinnettiin yksiulotteisena, joten runkotolppien tai paneeliverhouksen takana olevan koolauksen vaikutuksia ei otettu huomioon. Rakenteen U-arvo kohdalta, jossa ei ole runkotolppaa on noin $0,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Koko rakenteen todellinen U-arvo riippuu mm. runkotolppien jaosta ja mitoista.

W3 Betonisandwich-seinä

Seinärakenne W3 on tyypillinen suomalaisen 1960-luvun elementtikerrostalon ei-kantavan ulkoseinän rakenne. Uloimpana on tyypillisesti maalattu 50 mm teräsbetoniulko-kuori, seuraavana 90 mm mineraalivillaeriste ja sisimpänä 70 mm teräsbetoninen sisäkuori. Kantavien seinien elementissä sisäkuoren paksuus on yleensä 150 mm. (Ympäristöministeriö 2016)



- | | | |
|----|-----------------------|-------|
| 1. | Teräsbetoniulko-kuori | 50 mm |
| 2. | Lasivilla | 90 mm |
| 3. | Teräsbetonisisäkuori | 70 mm |

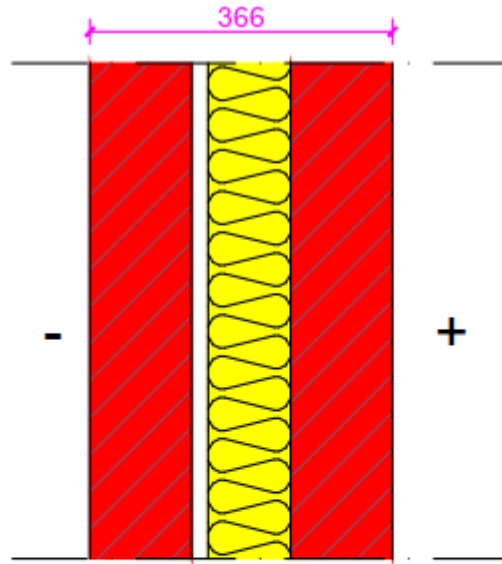
$$U_{\text{ref}} = 0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kuva L1.3. Seinärakenteen W3 rakenneleikkaus.

Tässä työssä rakenne mallinnettiin yksiulotteisena, joten ansaiden tai muiden kylmäsiltojen vaikutuksia ei otettu huomioon.

W4 Tiili-villa-tiiliseinä

Seinärakenne W4 on suomalaisille 1960-luvun omakotitaloille tyypillinen ulkoseinärakenne. Työvara on usein täyttynyt osittain muurauslaastilla.



- | | | |
|----|---------------|--------|
| 1. | Umpitiili | 123 mm |
| 2. | Työvara/ilmaa | 20 mm |
| 3. | Lasivilla | 100 mm |
| 4. | Umpitiili | 123 mm |

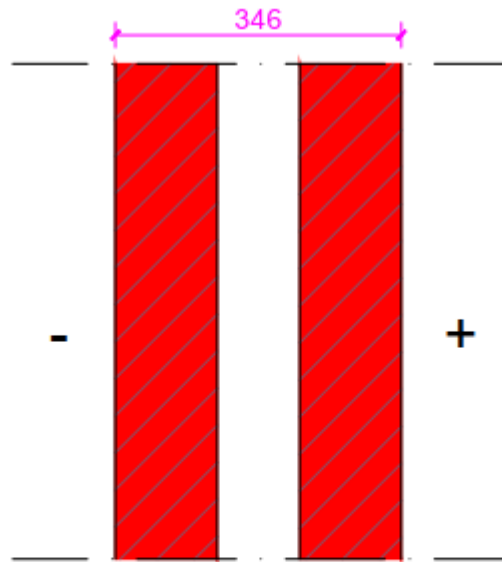
$$U_{\text{ref}} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kuva L1.4. Seinärakenteen W4 rakenneleikkaus.

Tässä työssä mallinnukset tehtiin yksiulotteisina, joten muuraussiteiden tai muiden vastaavien epähomogeenisten kohtien vaikutuksia ei otettu huomioon.

W5 Eristämätön kuorimuuriseinä, ”cavity wall”

Seinärakenne W5 ei ole Suomessa tyypillinen seinärakenne. Tämänkaltaisia seinärakenteita on kuitenkin käytetty Keski-Euroopassa, kuten Saksassa, 1940-luvulle saakka.



- | | | |
|----|-----------|--------|
| 1. | Umpitiili | 123 mm |
| 2. | Ilmaväli | 100 mm |
| 3. | Umpitiili | 123 mm |

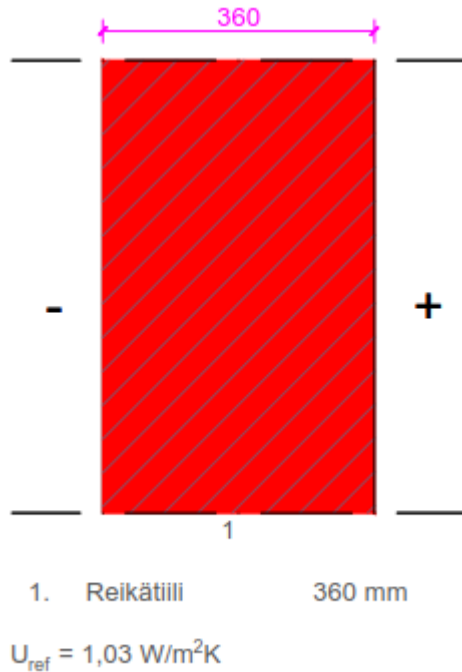
$$U_{\text{ref}} = 1,33 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kuva L1.5. *Seinärakenteen W5 rakenneleikkaus.*

Tässä työssä mallinnukset tehtiin yksiulotteisina, joten muuraussiteiden tai muiden vastaavien epähomogeenisten kohtien vaikutuksia ei otettu huomioon.

W6 Massiivitiiliseinä reikätiilistä

Seinärakenne W6 on massiivitiiliseinä, joka on muuten samanlainen kuin W1, mutta umpitiilien sijasta on käytetty reikätiiliä, joilla on parempi lämmöneristyskyky.



Kuva L1.6. *Seinärakenteen W6 rakenneleikkaus.*

Tässä työssä mallinnukset tehtiin yksiulotteisina, joten muuraussiteiden tai muiden vastaavien epähomogeenisten kohtien vaikutuksia ei otettu huomioon.

LIITE 2: PARAMETRIT JA KERTOIMET RAKENTEILLE

Taulukko L2.1. Pintojen säteilyn absorptiokertoimet ja emissiviteetit.

Materiaali	α_s [-]	α_{lw} [-]	ϵ_{lw} [-]
Poltettu täystiili	0,63	0,93	0,93
Poltettu reikätiili	0,63	0,93	0,93
Puu (tummaksi maalattu pinta)	0,80	0,90	0,90
Betoni	0,65	0,91	0,91

Taulukko L2.2. Pintavastukset, kosteudensiirtokertoimet ja sisäilman lämpötila.

Kerroin	Arvo
R_{si}	0,13 [W/m ² K]
R_{se}	0,04 [W/m ² K]
T_{int}	21 [°C]
β_{int}	2.235E-8 [s/m]
β_{ext}	1.295E-7 [s/m]
α_{rain}	0,70 [-]

LIITE 3: MATERIAALIOMINAISUUDET

Taulukko L3.1. Yleiset materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/(kgK)]	Lämmön- johtavuus [W/(mK)]	Vesihöyryn dif- fuusiovastusker- roin [-]
Poltettu täystiili (WUFISTA)	1900	0,24	850	0,60	10,0
Poltettu reikätiili (FRAME)	1430	0,30	900	0,45	12,0
Puu (mänty)	532	0,90	2700	0,12	84
Lasivilla	22	0,98	850	0,035	1,2
Kipsilevy 13 mm	574	0,77	1100	0,19	6,9
Tuulensuojakalvo 1,0 mm	250	0,60	1500	0,20	35
Höyrynsulkukalvo 1,0 mm	980	0,001	2300	0,40	89000
Ilmaväli 20 mm	1,3	0,999	1000	0,13	0,56
Ilmaväli 100 mm	1,3	0,999	1000	0,59	0,15
Betoni	2300	0,18	850	1,6	130

Taulukko L3.2. Lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden funktiona.

Lasivilla	w [kg/m ³]	0	0,45	0,66	1,3	2,4	980
	λ [W/(mK)]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,60
Kipsilevy	w [kg/m ³]	0	4,6	6,7	10,1	17,7	770
	λ [W/(mK)]	0,19	0,19	0,19	0,20	0,21	0,60
Puu (mänty)	w [kg/m ³]	0	32	62	123	185	900
	λ [W/(mK)]	0,1	0,11	0,12	0,1	0,15	0,60
Umpitiili (WUFI)	w [kg/m ³]	0	240				
	λ [W/(mK)]	0,60	1,737				
Betoni	w [kg/m ³]	0	180				
	λ [W/(mK)]	1,6	2,602				
Poltettu reikätiili (FRAME)	w [kg/m ³]	0	300				
	λ [W/(mK)]	0,45	1,205				

Taulukko L3.4. Kosteusdiffusiviteetit.

Materiaali	w [kg/m ³]	DWS / DWW [m ² /s]
Umpitiili (WUFI)	0	0
	10,0	1,5E-10
	190	1,7E-06
Puu (mänty)	0,00E+00	0,00E+00
	62,6	1,32E-+13
	870	8,03E-11
Kipsilevy 13 mm	0,00E+00	0,00E+00
	8	1,85E-10
	371	1,59E-07
Betoni	0	0,00E+00
	72	7,40E-11
	85	2,50E-10
	100	1,00E-09
	118	1,20E-09
Poltettu reikätiili (FRAME)	0	0
	13	3,10E-9
	262	2,20E-6

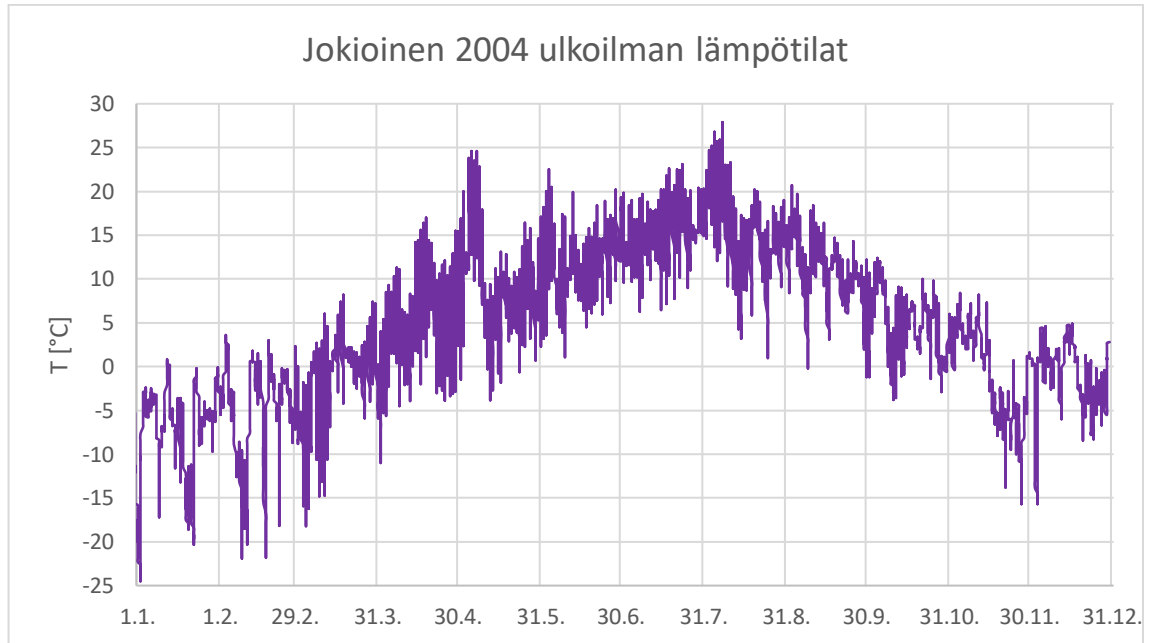
DWS = kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti

DWW = kosteusdiffusiviteetti kapillaarisesti siirtyvän kosteuden uudelleenjakautumiselle materiaalissa

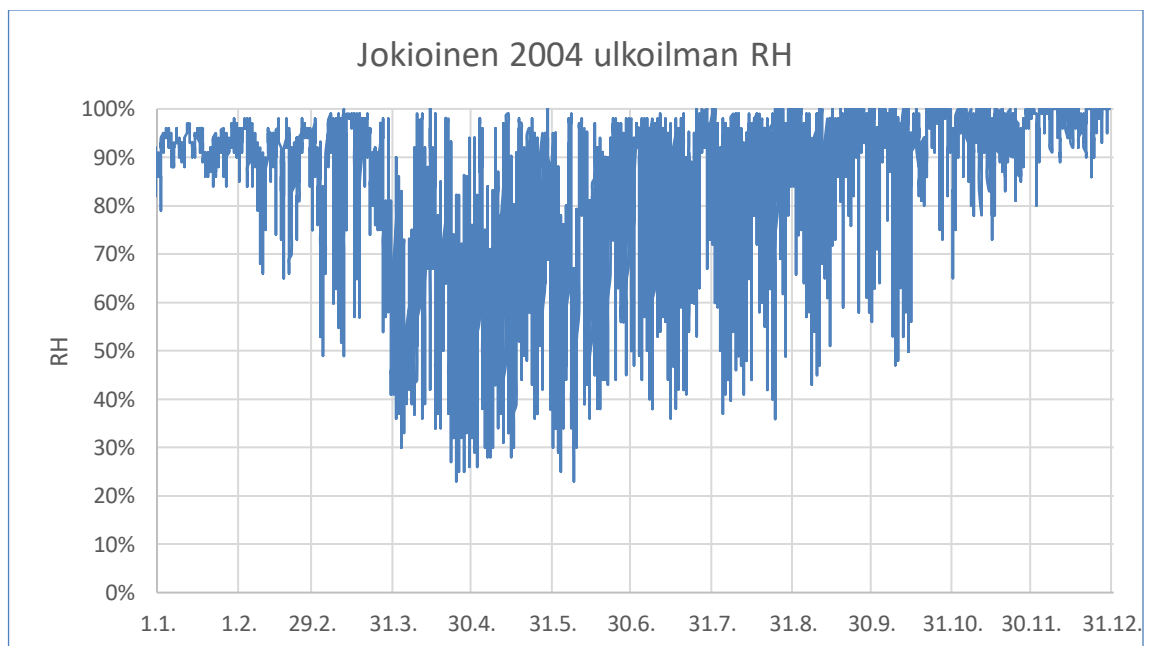
Tämän työn laskelmissa on käytetty kosteusdiffusiviteettina kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteettia DWS. Kosteusdiffusiviteetit on interpoloitu logaritmisesti taulukon arvoista

LIITE 4: ULKOILMAN OLOSUHTEET

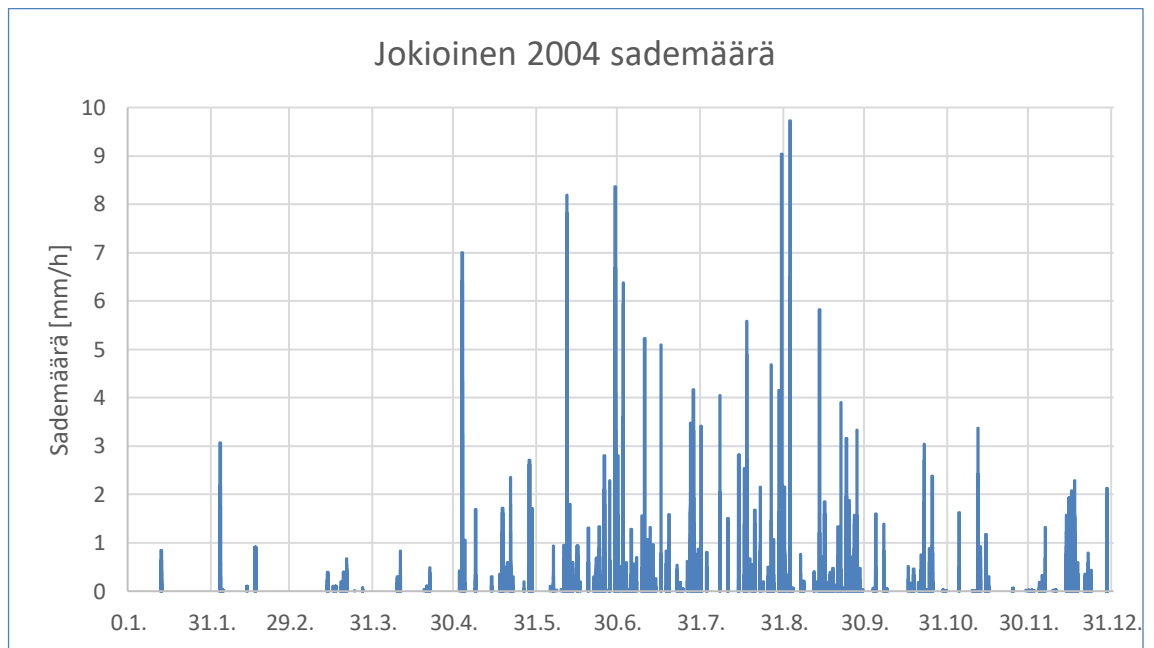
JOKIOINEN 2004



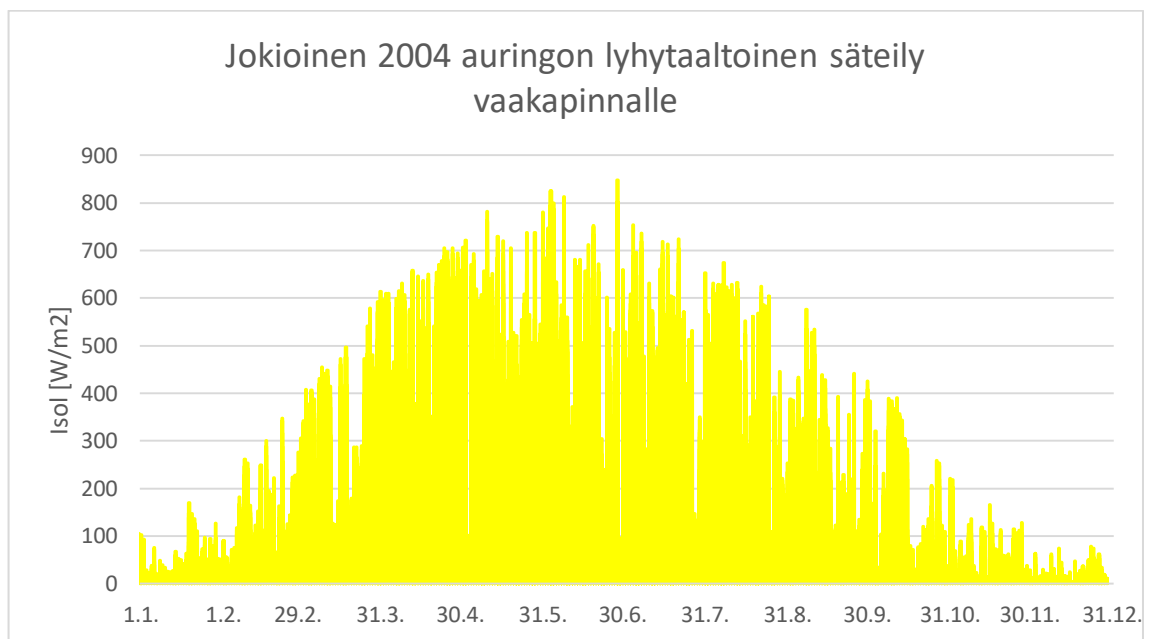
Kuva L4.1. Jokioinen 2004 ulkoilman lämpötilat.



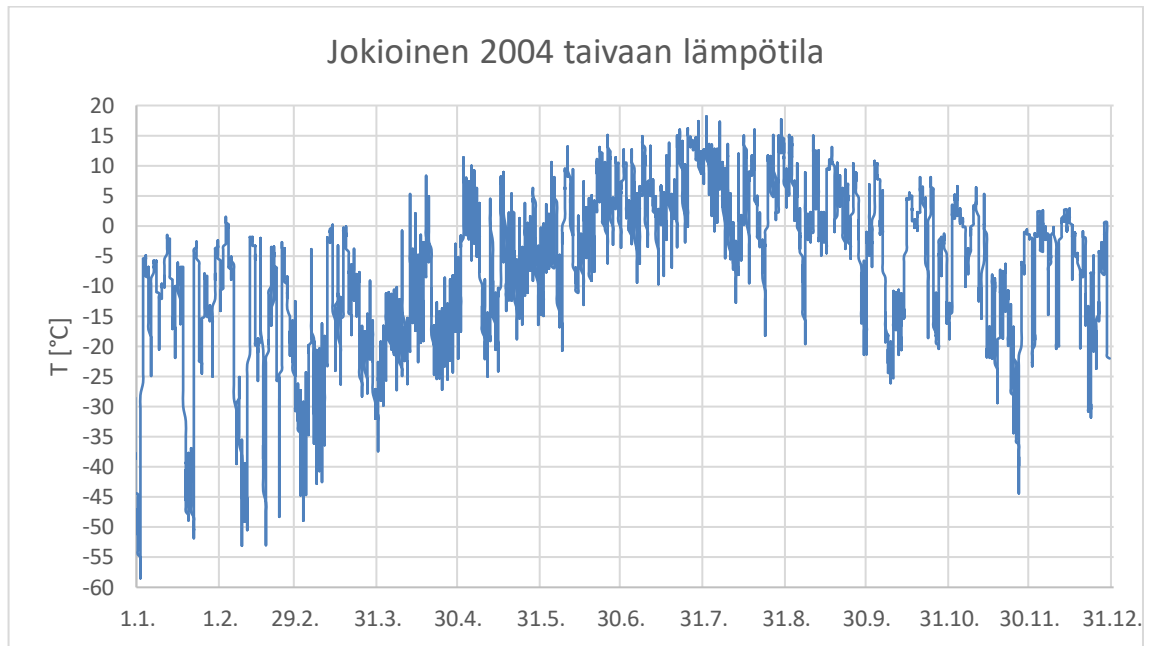
Kuva L4.2. Jokioinen 2004 ulkoilman suhteellinen kosteus.



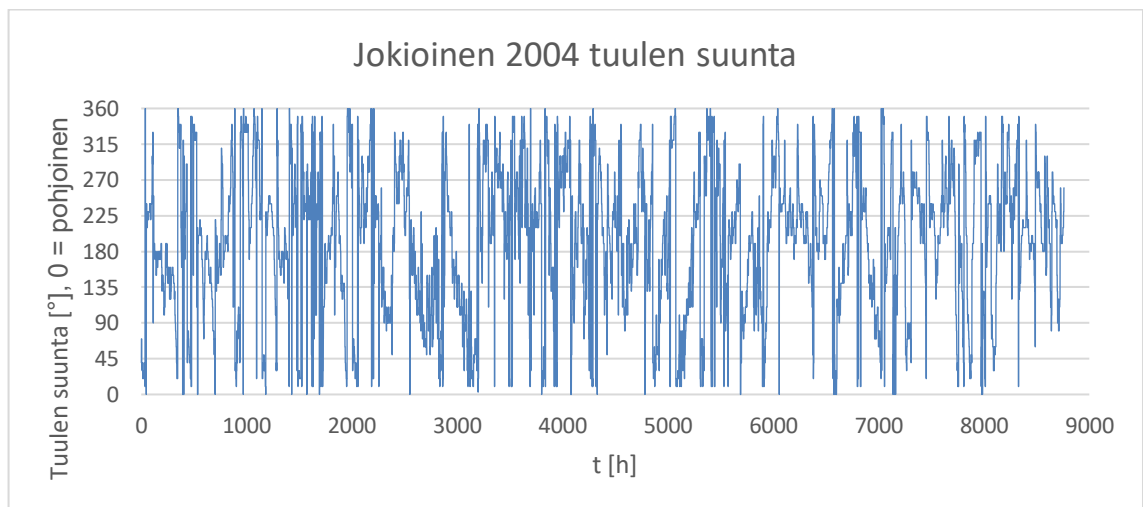
Kuva L4.3. *Jokioinen 2004 sademäärä vaakapinnalle.*



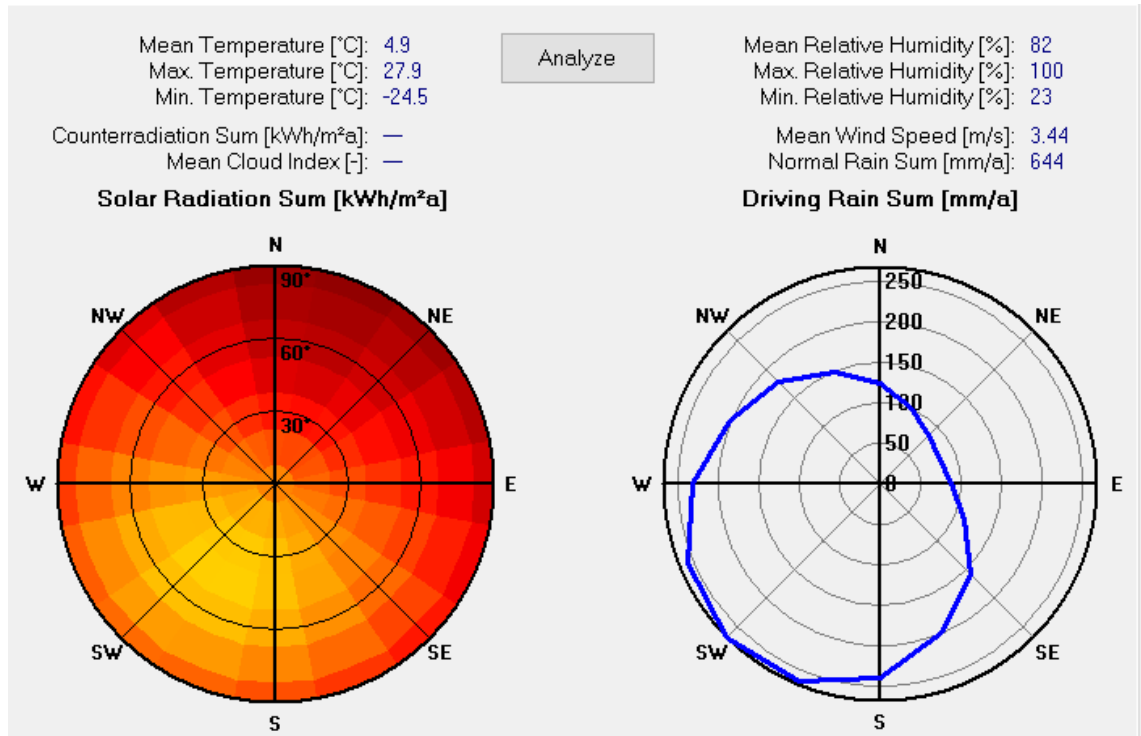
Kuva L4.4. *Jokioinen 2004 auringon säteilyteho vaakapinnalle.*



Kuva L4.5. *Jokioinen 2004 tehollinen taivaan lämpötila (Jokela 2018).*



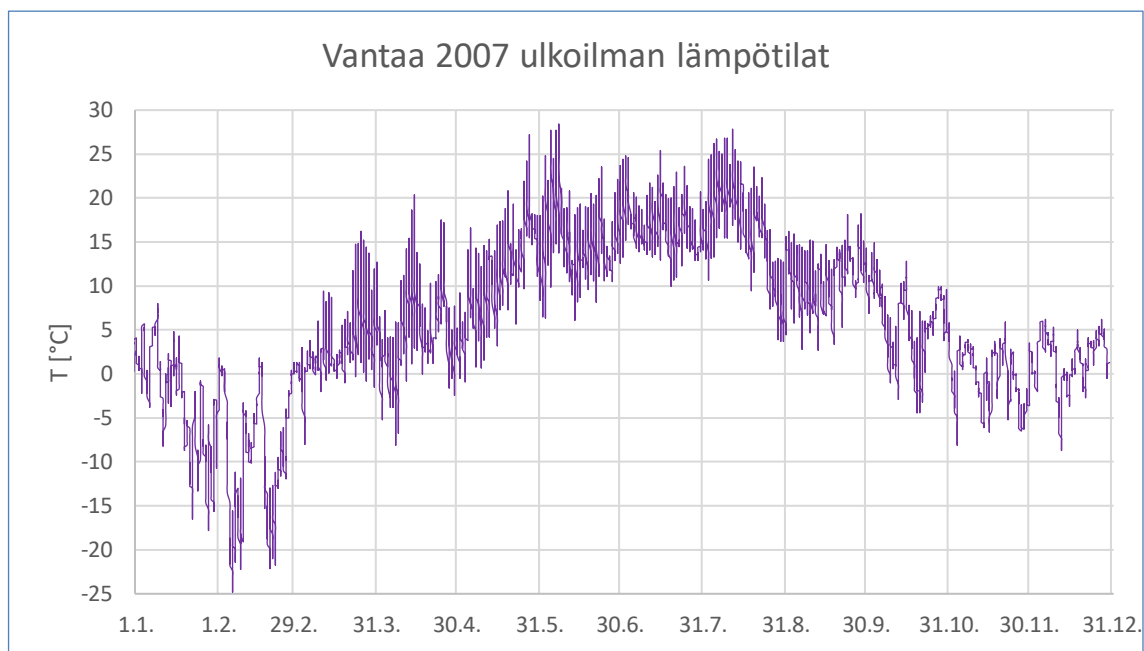
Kuva L4.6. *Jokioinen 2004 tuulen suunta.*



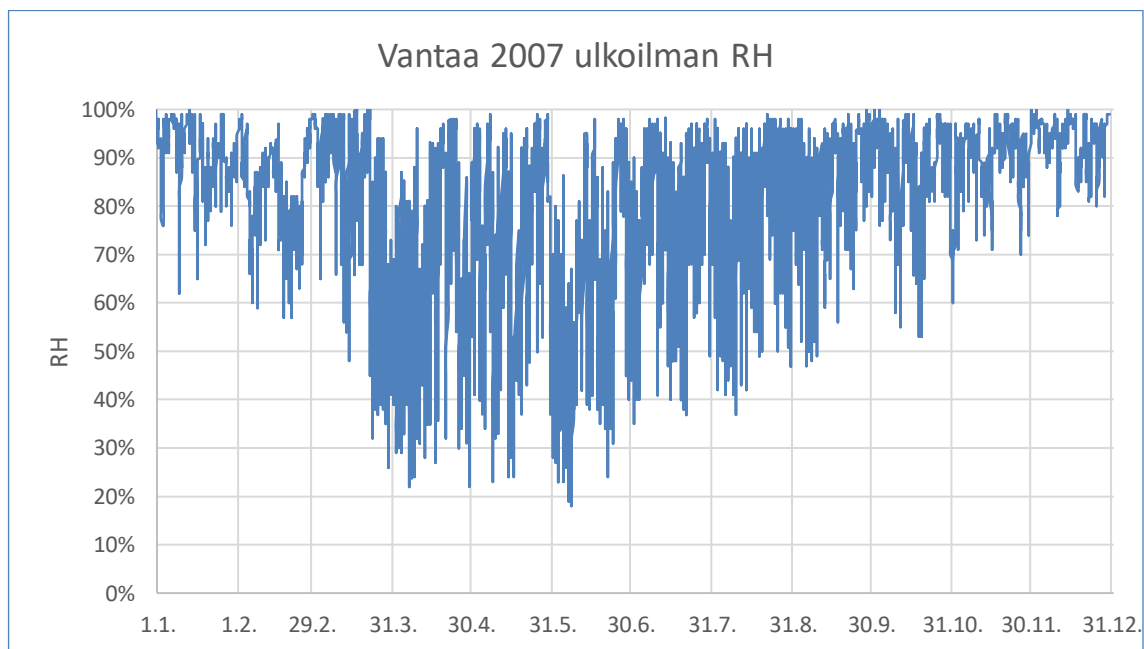
Kuva L4.7. Jokioinen 2004 auringon säteilyn ja viistosateen vuosisummat eri suuntaisille pinnoille.

Auringon säteilyn vuosisumman maksimi pystysuoralle pinnalle on 848 kWh/(m²a), ilmansuunta lounas

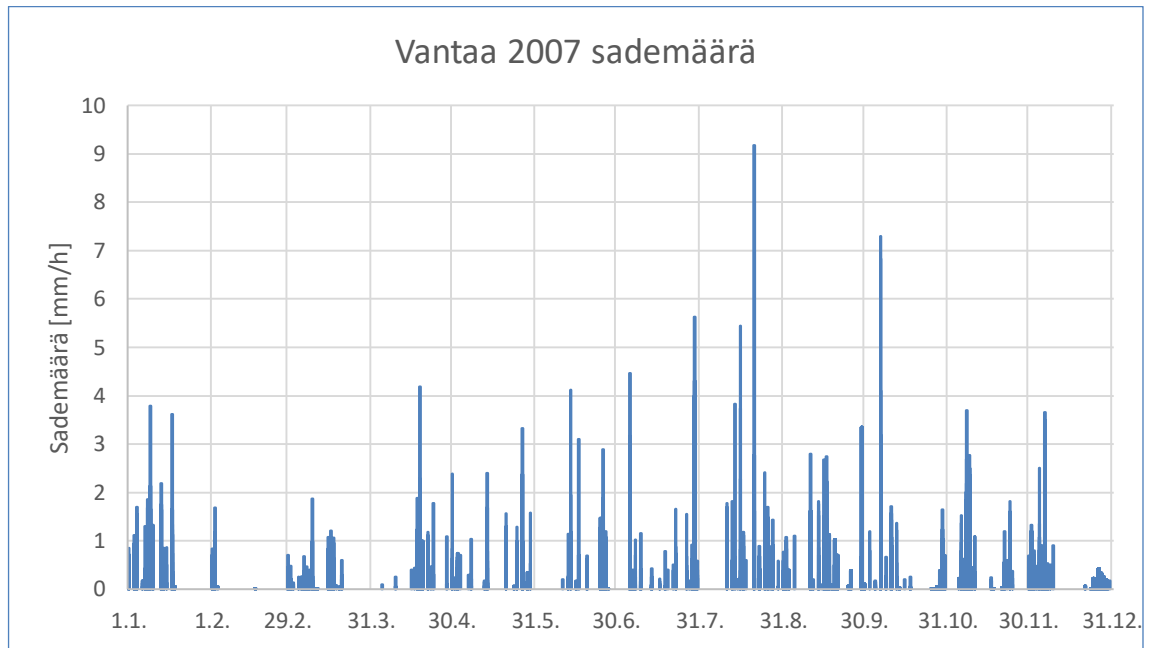
VANTAA 2007



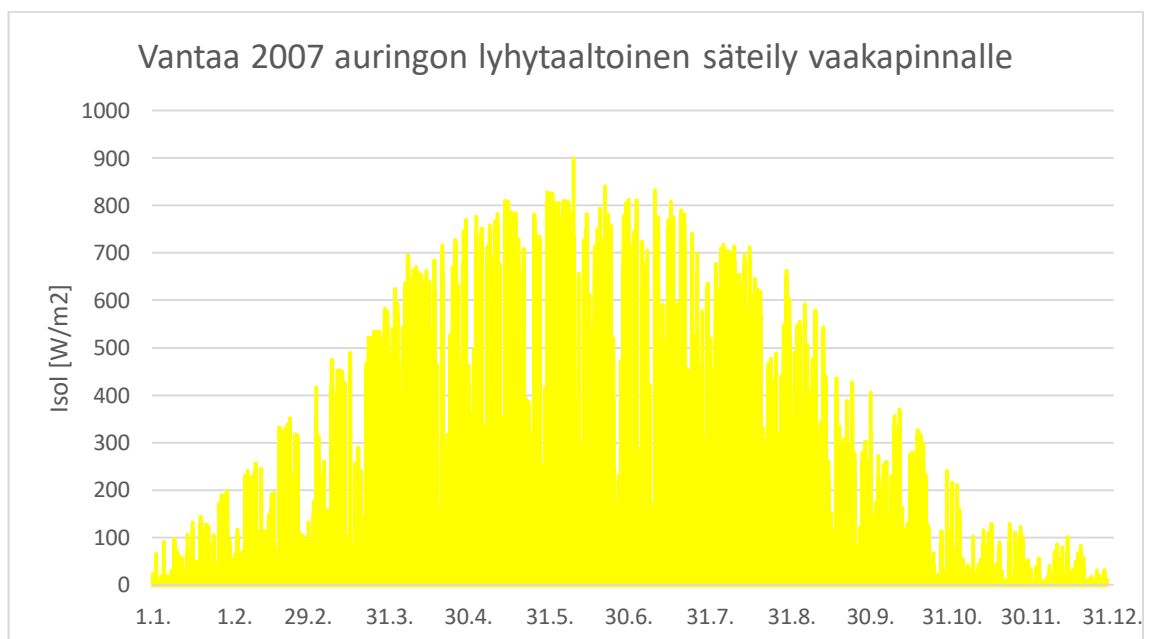
Kuva L4.8. *Vantaa 2007 ulkoilman lämpötilat.*



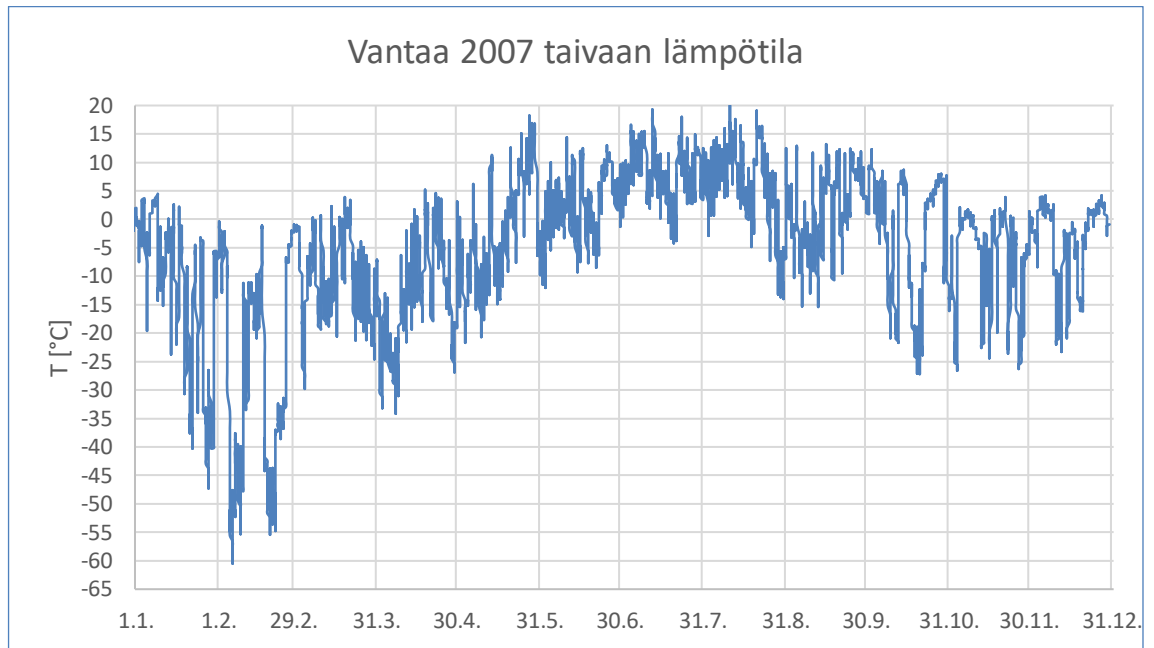
Kuva L4.9. *Vantaa 2007 ulkoilman suhteellinen kosteus.*



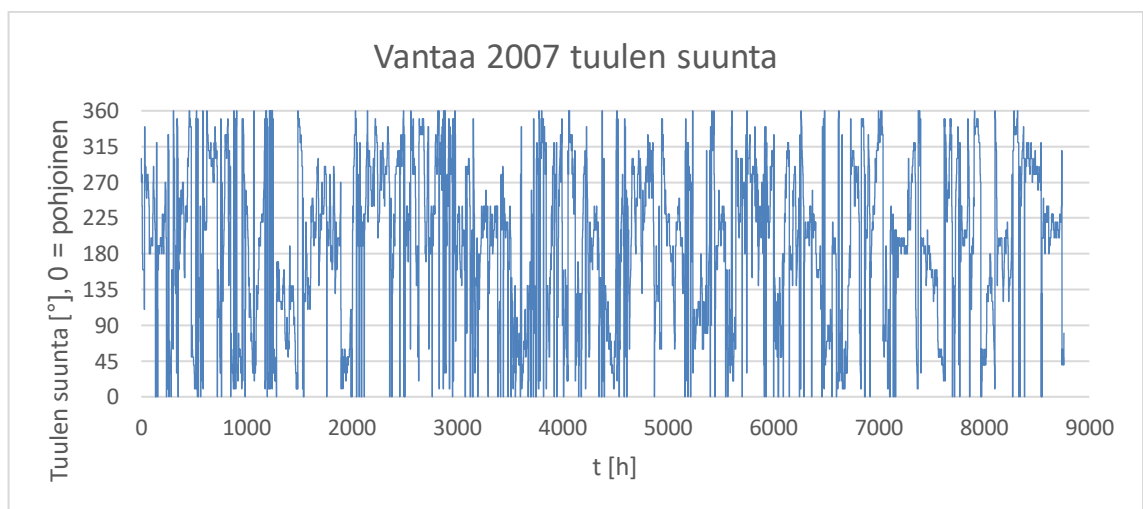
Kuva L4.10. Vantaa 2007 sademäärä vaakapinnalle.



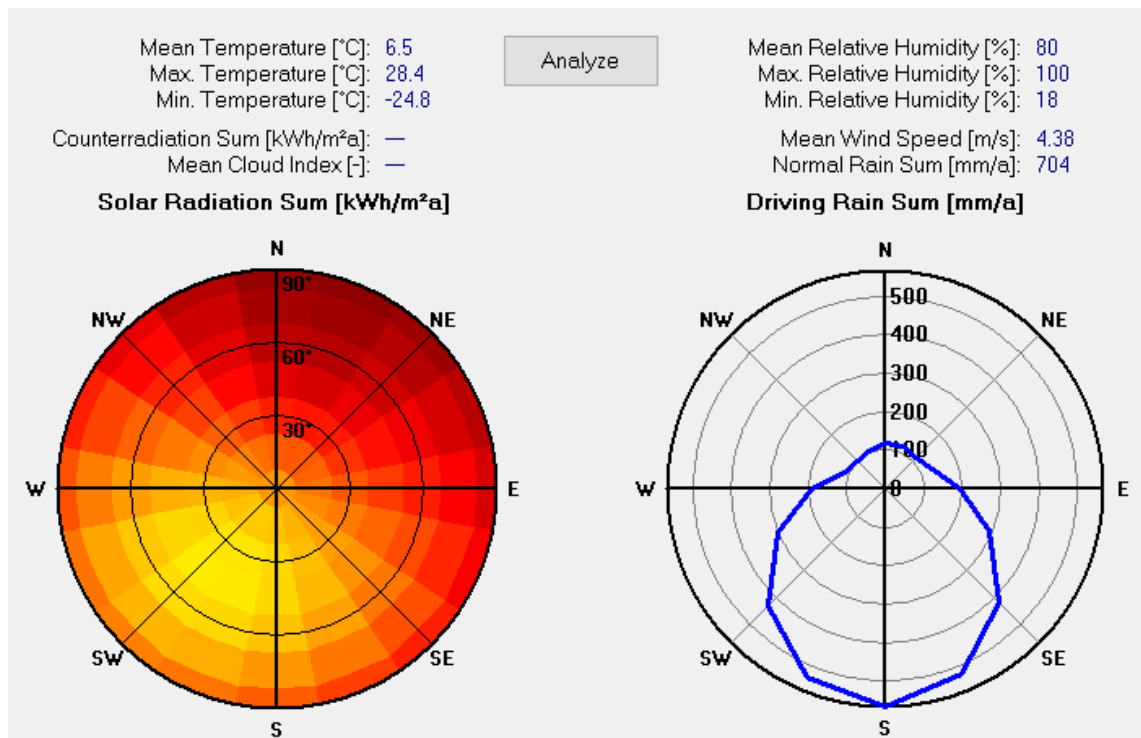
Kuva L4.11. Vantaa 2007 auringon säteilyteho vaakapinnalle.



Kuva L4.12. *Vantaa 2007 taivaan tehollinen lämpötila (Jokela 2018).*



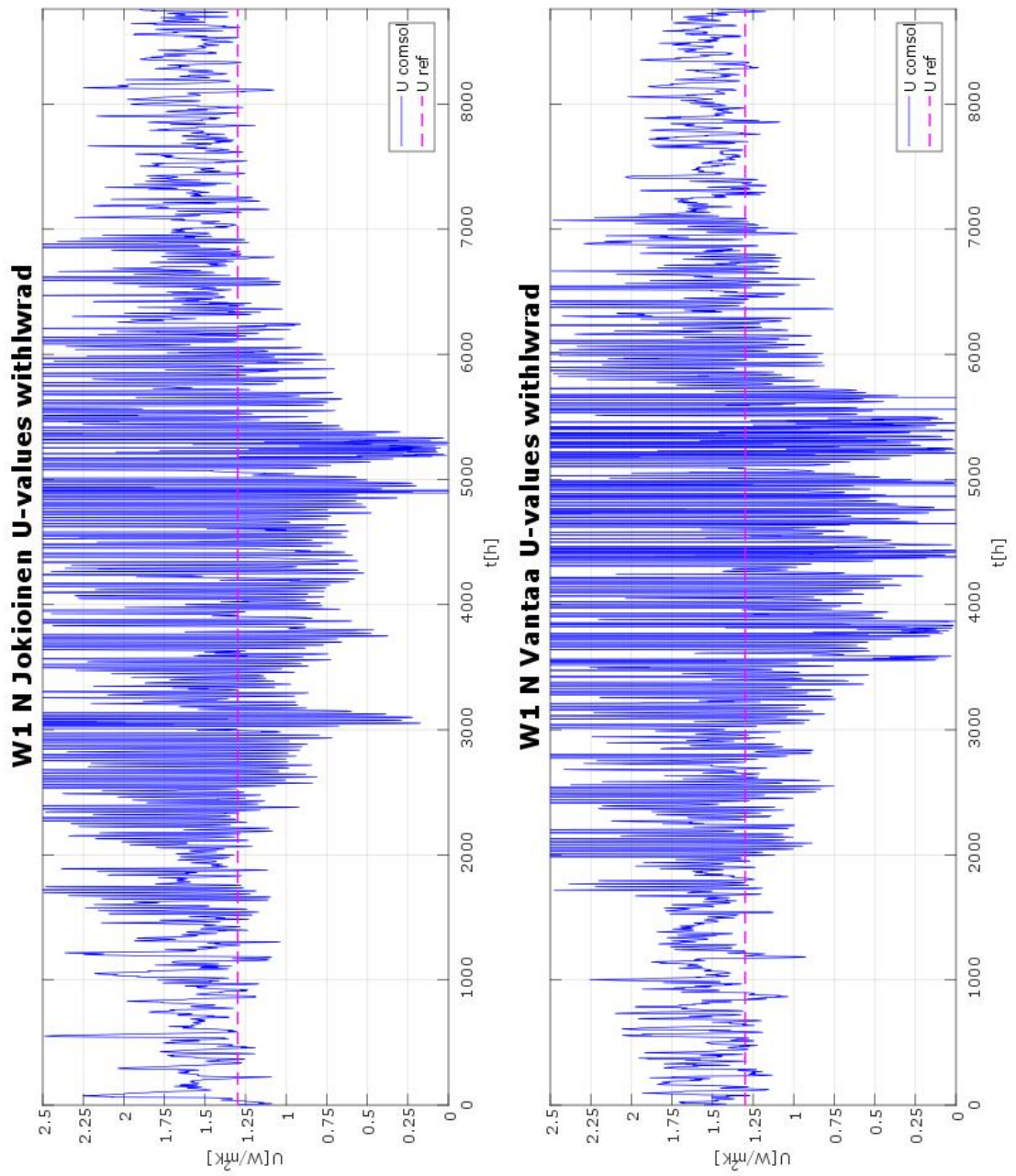
Kuva L4.13. *Vantaa 2007 tuulen suunta.*



Kuva L4.14. Vantaa 2007 auringon säteilyn ja viistosateen vuosisummat eri suuntaisille pinnoille.

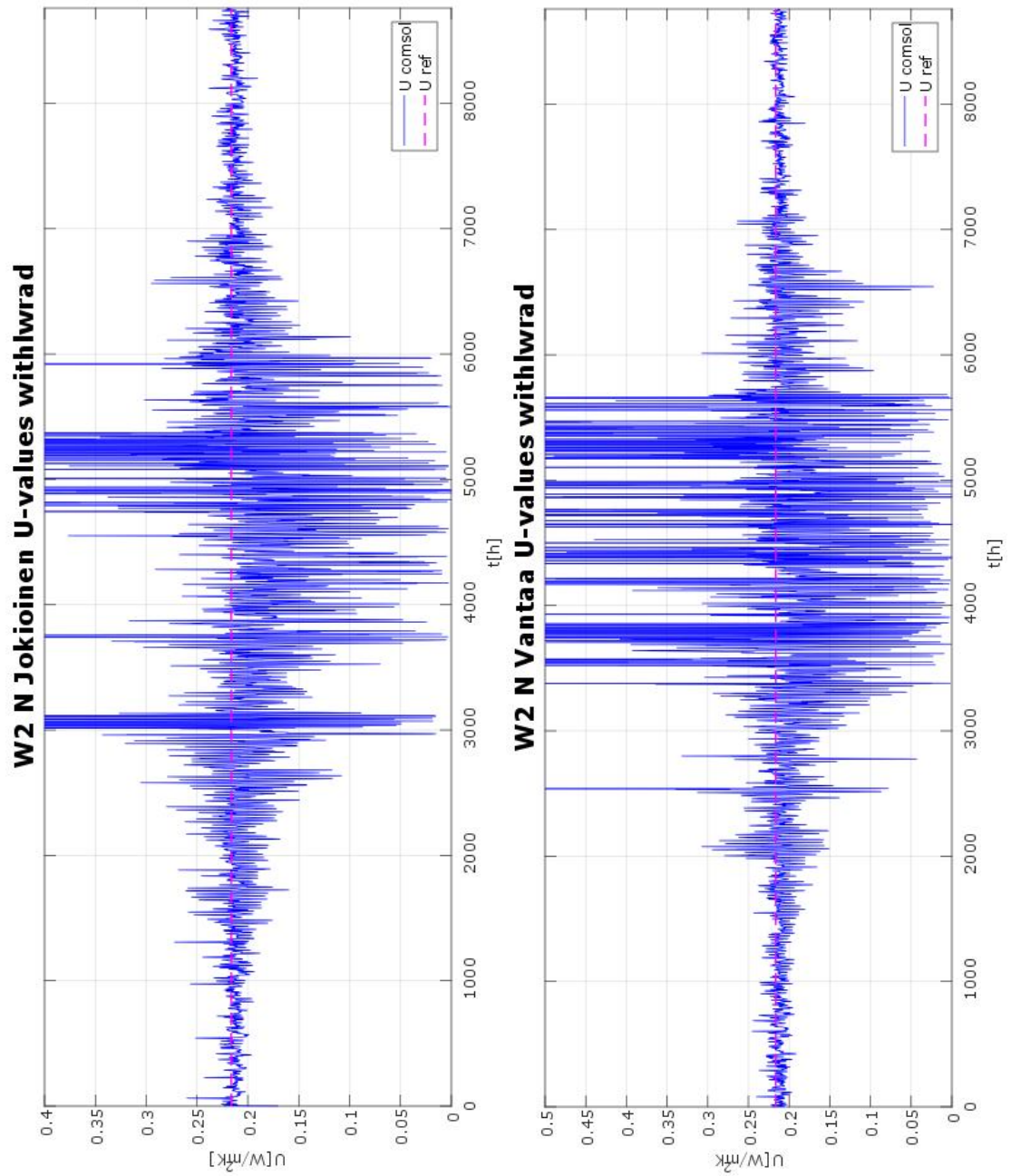
Auringon säteilyn vuosisumman maksimi pystysuoralle pinnalle on 898 kWh/(m²a), ilmansuunta lounas

LIITE 5: LASKENNAN TULOKSENA SAATUJA U-ARVON KUVAAJIA



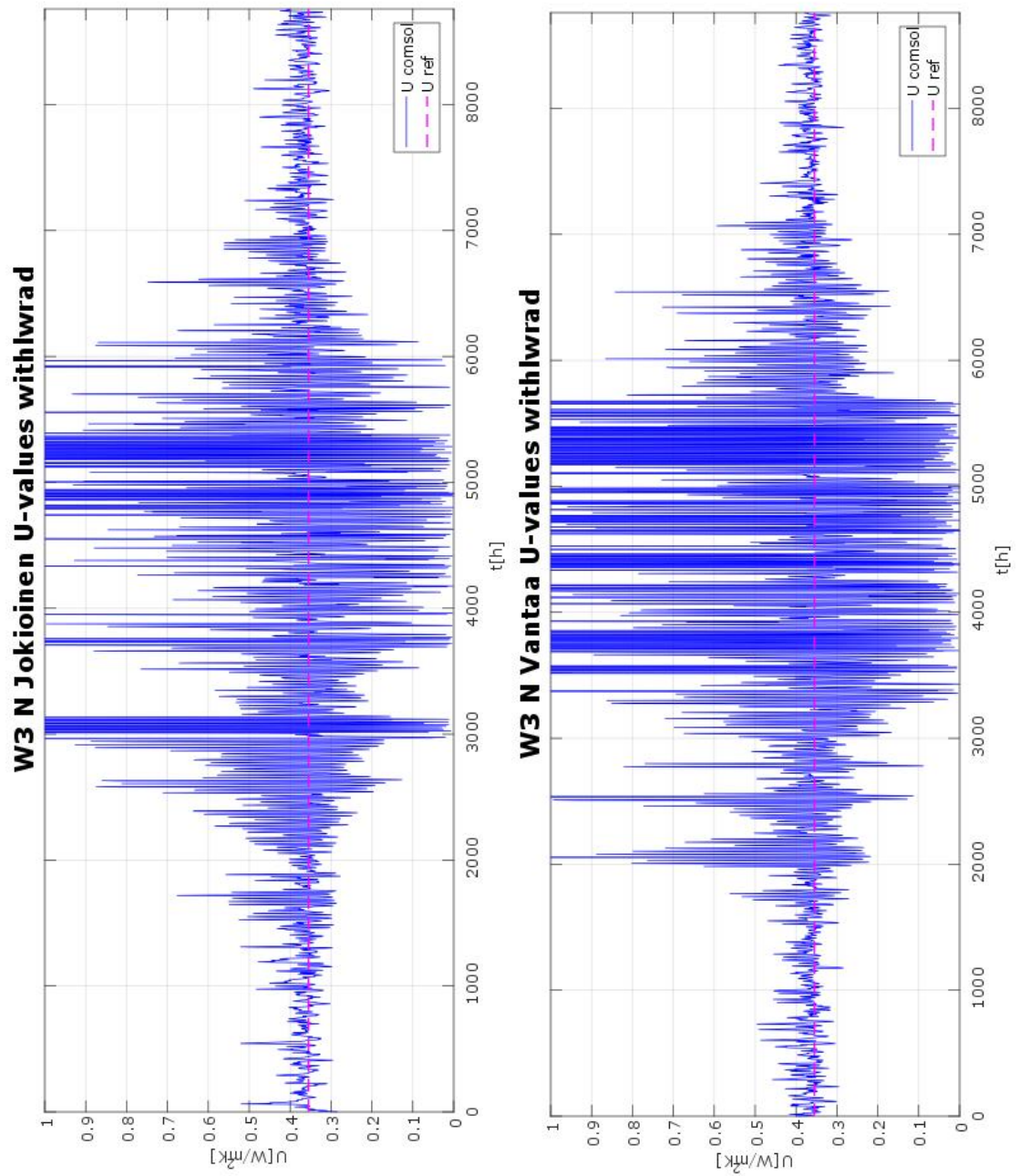
Kuva L5.1.

Seinärakenteen W1 mallinnustuloksista laskettu U-arvo, Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007 pohjoisseinä.

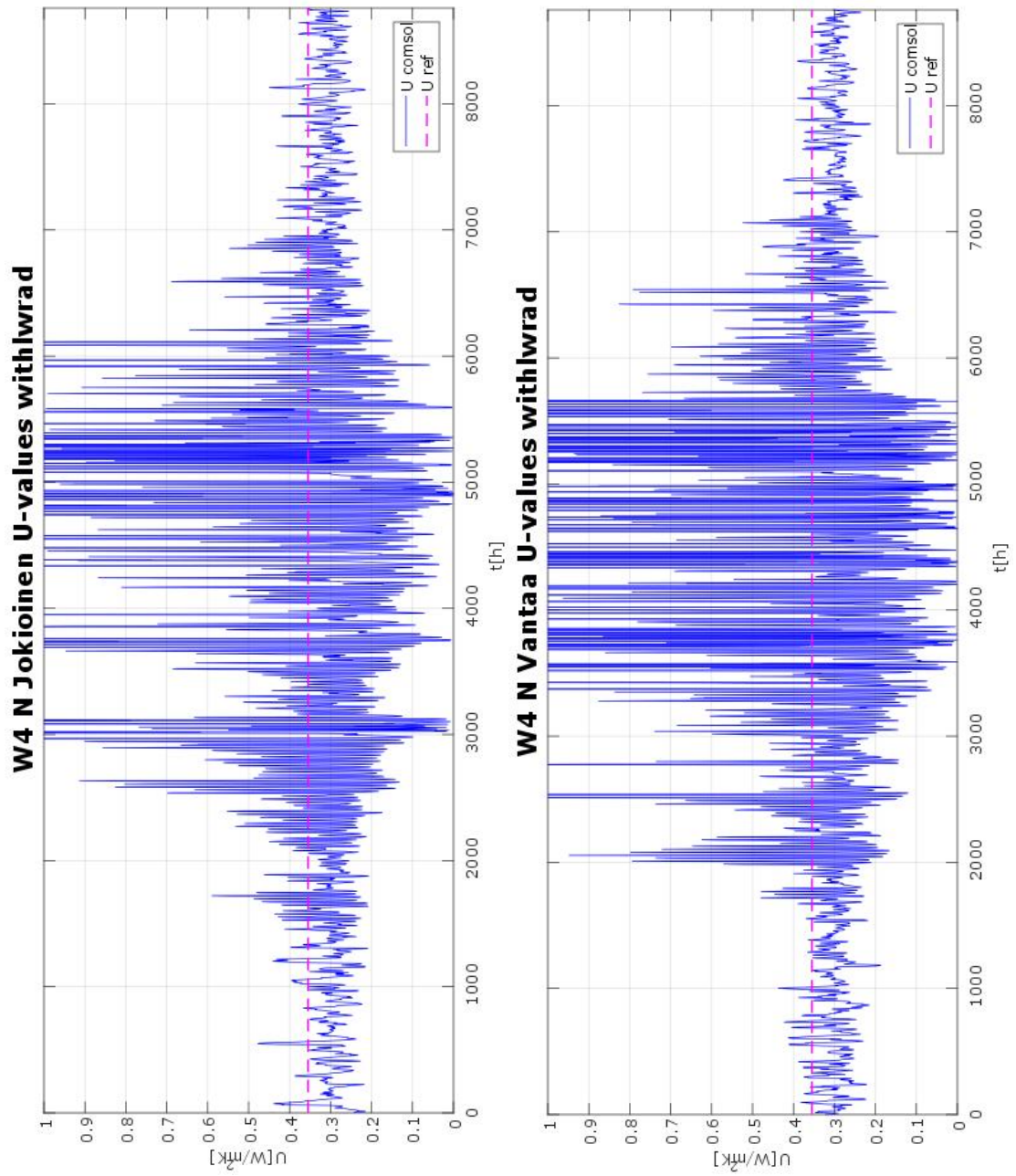


Kuva L5.2.

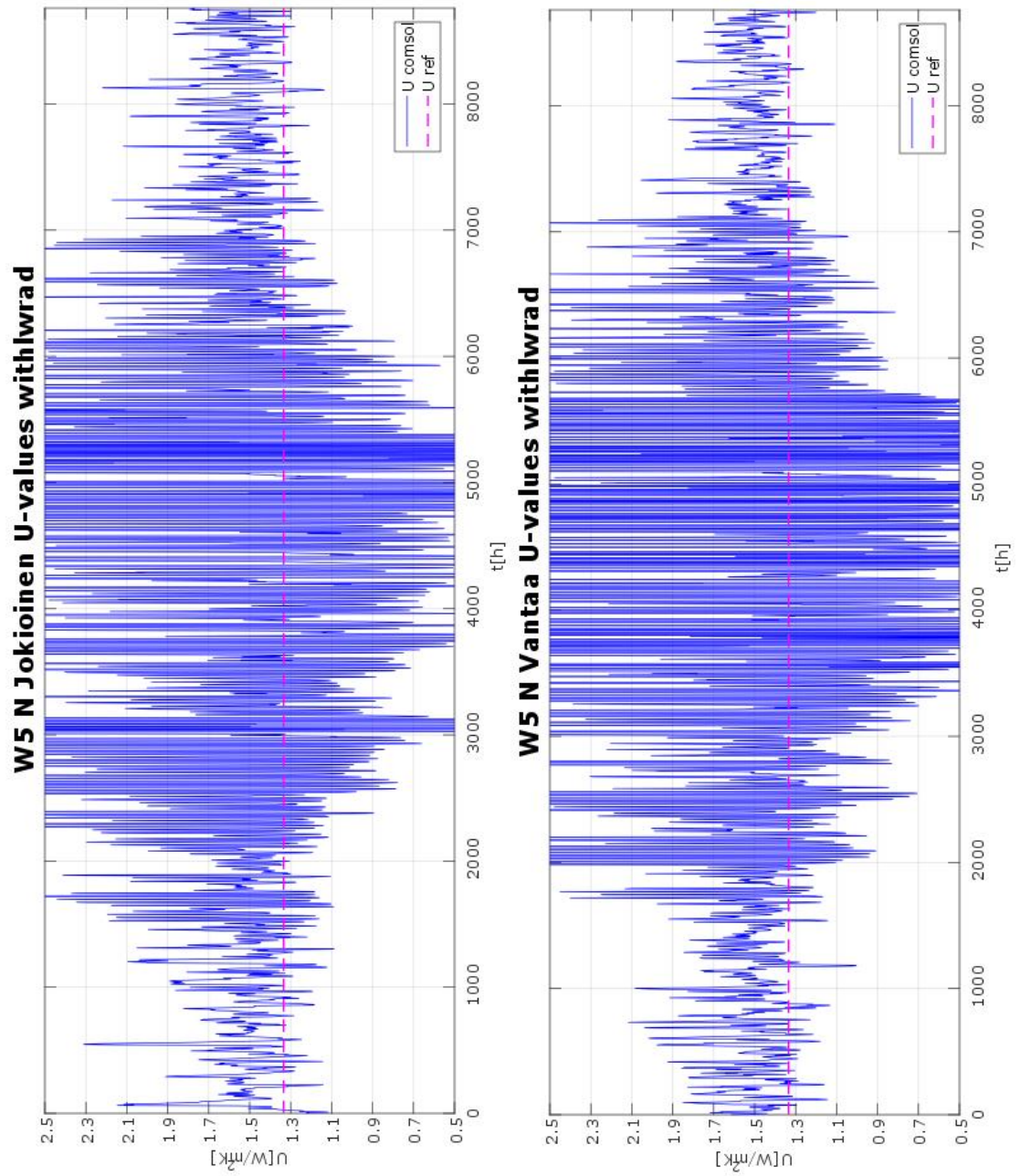
Seinärakenteen W2 mallinnustuloksista laskettu U-arvo Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007 pohjoisseinä.



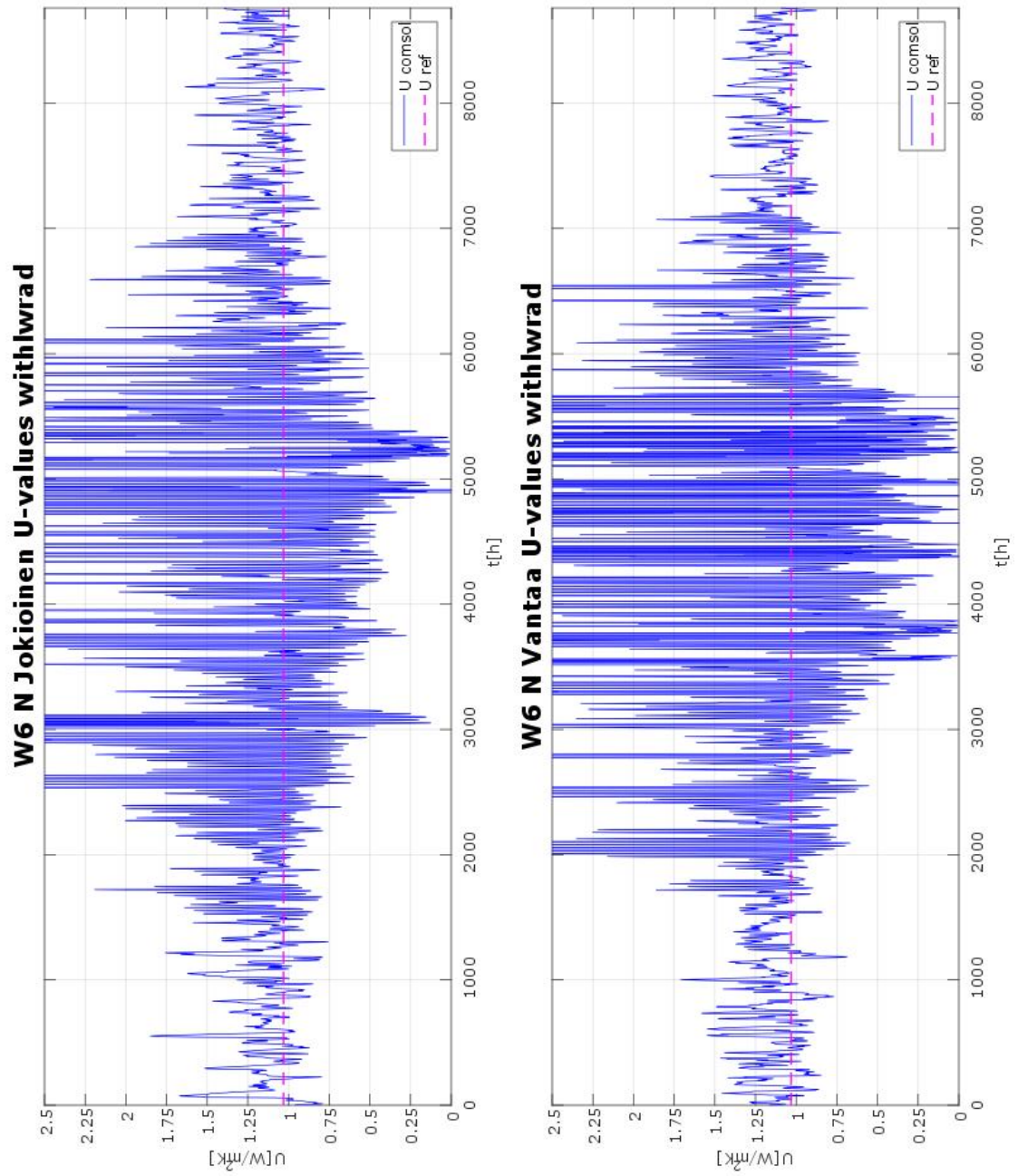
Kuva L5.3. Seinärakenteen W3 mallinnustuloksista laskettu U-arvo Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007 pohjoisseinä.



Kuva L5.4. Seinärakenteen W4 mallinnustuloksista laskettu U-arvo Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007 pohjoisseinä.



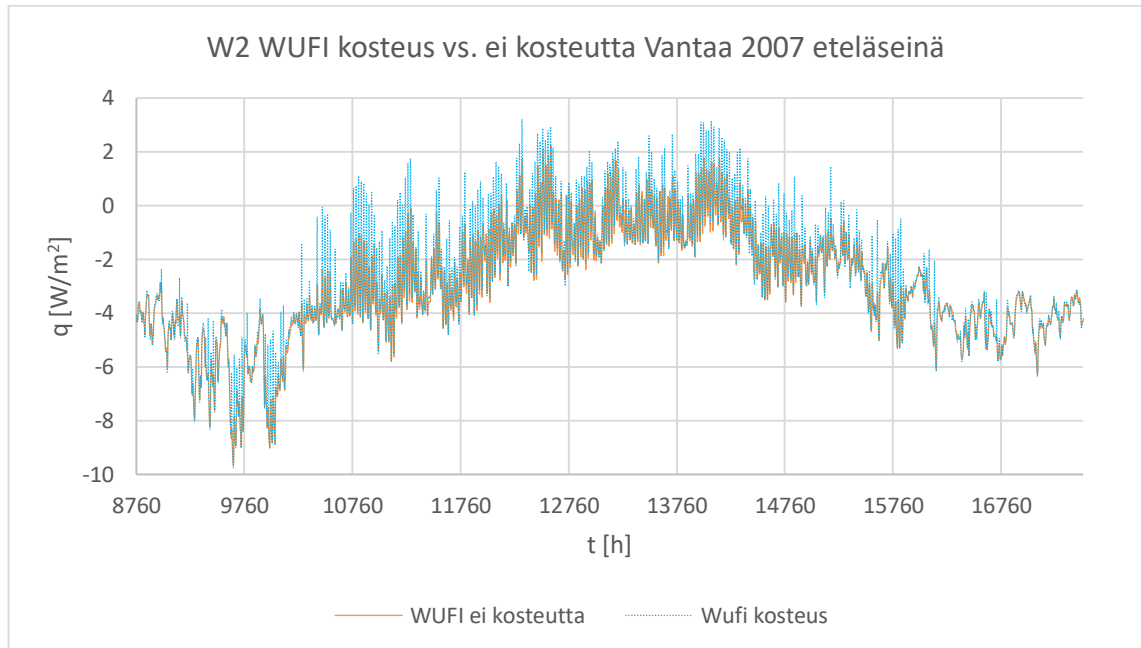
Kuva L5.5. Seinärakenteen W5 mallinnustuloksista laskettu U-arvo Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007 pohjoisseinä.



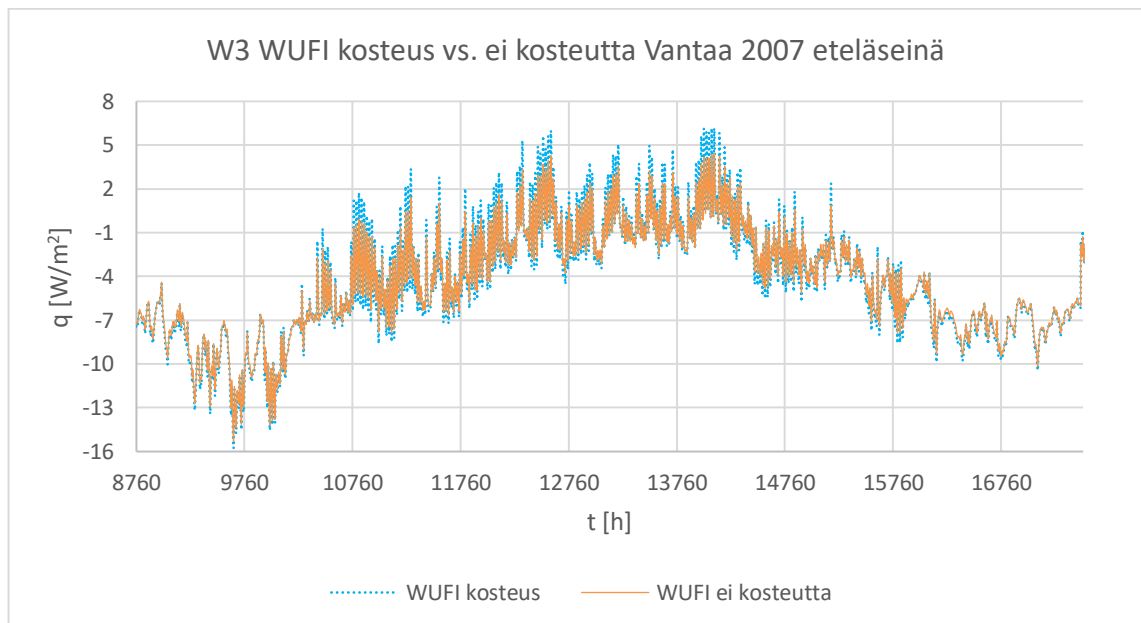
Kuva L5.6.

Seinärakenteen W6 mallinnustuloksista laskettu U-arvo Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007 pohjoisseinä.

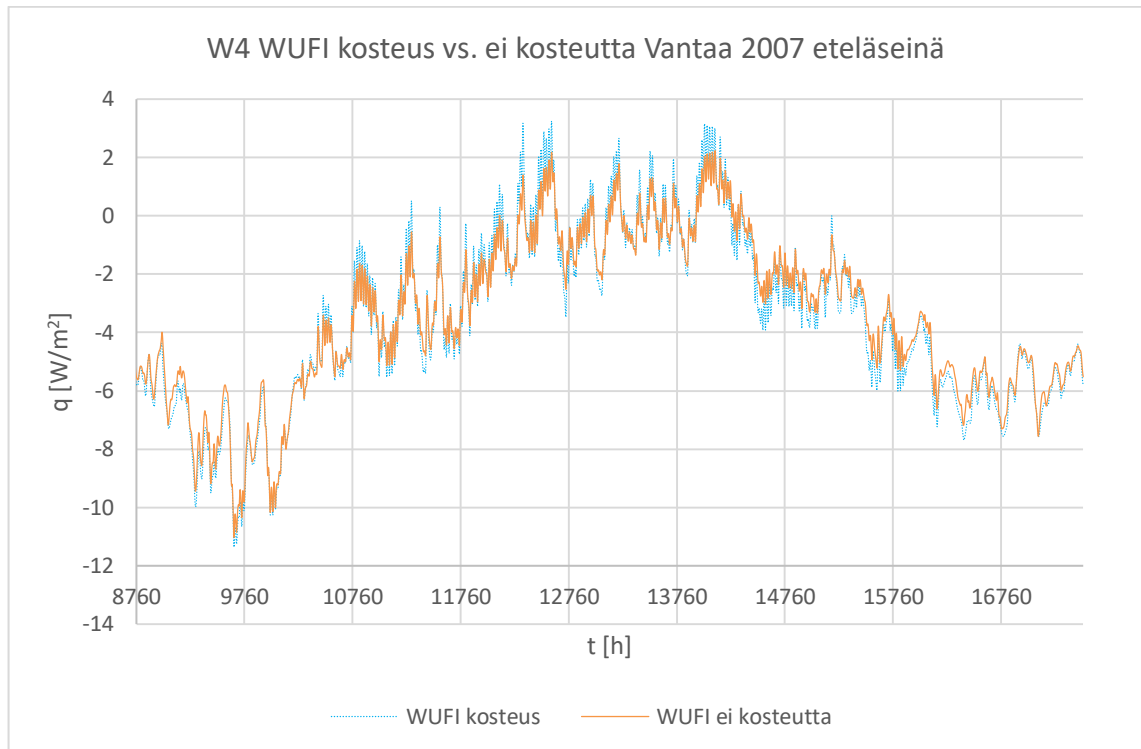
LIITE 6: KOSTEUDENSIIRRON VAIKUTUS RAKENTEIDEN SISÄPINNAN LÄMPÖVIRRRAN TIHEYTEEN



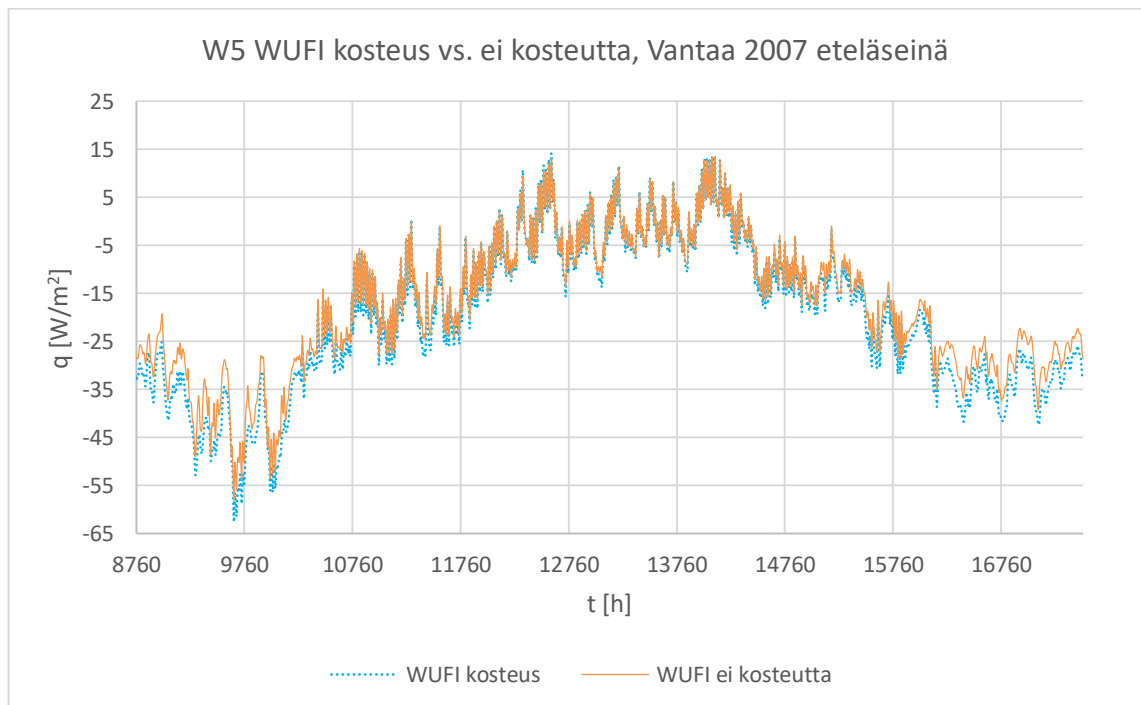
Kuva L6.1. Kosteudensiirron vaikutus rakenteen W2 sisäpinnan lämpövirran tiheyteen.



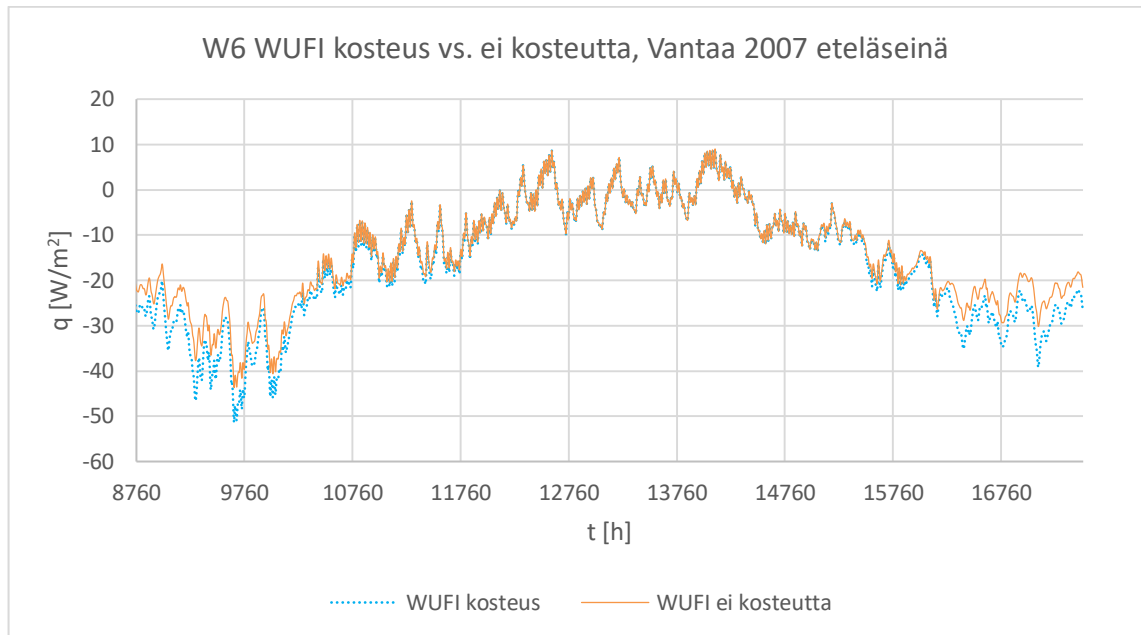
Kuva L6.2. Kosteudensiirron vaikutus rakenteen W3 sisäpinnan lämpövirran tiheyteen.



Kuva L6.3. Kosteudensiirron vaikutus rakenteen W4 sisäpinnan lämpövirran tiheyteen.



Kuva L6.4. Kosteudensiirron vaikutus rakenteen W5 sisäpinnan lämpövirran tiheyteen.



Kuva L6.5. Kosteudensiirron vaikutus rakenteen W6 sisäpinnan lämpövirran tiheyteen.